

상용 크라이오펌프의 배기특성 분석

인상렬† · 박미영

한국원자력연구소
(2003년 1월 16일 접수)

Analysis on the Pumping Characteristics of a Commercial Cryopump

S. R. IN† and M. Y. Park

Korea Atomic Energy Research Institute
(Received January 16, 2003)

요 약

초고진공용으로 시판되고 있는 G-M 냉동기 부착형 크라이오 펌프의 여러 기체에 대한 배기특성을 조사했다. 수소 및 중수소, 헬륨, 알곤, 질소, 일산화탄소의 배기량에 따른 배기속도의 변화를 측정하고 질소의 배기용량을 측정하였으며 그 경향을 이론적으로 분석했다. 또 크라이오펌프로 배기할 때 시스템의 잔류기체 변화에 대해서도 조사했다.

주제어 : 크라이오펌프, 배기속도, 배기용량, 활성탄, 흡착

Abstract

The pumping characteristics of a commercial UHV cryopump with a G-M refrigerator for various gases were investigated. The pumping speeds as a function of pumped amount of H₂, D₂, He, Ar, N₂, CO and the pumping capacity of N₂ were measured and the trend was theoretically analyzed. The spectrum change of the residual gas was also investigated during cryopump operation.

Key Words : cryopump, pumping speed, pumping capacity, activated carbon, sorption

1. 서 론

크라이오펌프는 극저온으로 냉각시킨 물체의 표면에 기체분자를 물리적으로 흡착하여 배기하는 펌프로 액체헬륨을 사용하여 금속면을 4 K로 냉각시켜서 기체를 응축시키는 방식과 압축 기체 헬륨을 사용하는 냉동기를 이용하여 흡착재의 온도를 15 K로 낮추어 기체를 흡착하는 방식이 있다. 전자는 핵융합실험장치 등 대형 진공용기에 내장형으로 많이 사용되는 반면 상용 크라이오펌프는 사용이 편리한

후자의 방식을 택하고 있다.

상용 크라이오펌프는 대개 2 단형 G-M 냉동기의 1 단에 열차폐 및 배플을 달고 2 단에 활성탄이 부착된 패널을 달아 헬륨을 포함한 모든 기체를 배기할 수 있다. 열차폐는 100 K 이하로 온도가 유지되는데 이는 15 K 패널을 주변의 300 K 복사열로부터 보호하여 냉동기가 합리적인 냉각능력으로 온도를 원활하게 내릴 수 있도록 해준다.

각종 기체들의 온도에 따른 증기압 곡선을 보면 대표적인 잔류기체 중 40~100 K 배플 및 열차폐

† E-mail : srin@kaeri.re.kr

에 응축할 수 있는 것은 물(응점 273 K) 밖에 없다는 것을 알 수 있다. 이산화탄소(승화점 194 K)도 60 K 이하의 온도라면 열차폐 또는 배플에 달라붙을 수 있다. 질소(응점 63 K), 산소(응점 55 K), 알곤(응점 84 K), 일산화탄소(응점 68 K), 메탄(응점 90 K) 등은 배플이나 열차폐에 응축하는 것은 불가능하고 주로 15 K 냉각패널의 바깥쪽 금속면에 부착된다. 수소(응점 14 K), 네온(24.5 K) 및 헬륨(응점 4.2 K)은 15 K 금속면에도 거의 붙지 않으므로 대부분 활성탄이 붙어 있는 냉각패널 안쪽 면에 흡착된다. 수소, 네온, 헬륨 외에 다른 응축성 기체분자들이 활성탄에 붙어서 세공을 막지 않도록 일반적으로 활성탄이 붙은 면은 배플과 열차폐에서 시선이 닿지 않는 패널 안쪽에 위치하지만 활성탄 패널이 너무 감추어져 있으면 배기작용을 원활하게 할 수 없다.

크라이오 펌프에서 각 기체의 흡착 지점 및 경로의 길이가 다르고 특히 금속면에 부착할 때와 활성탄에 부착할 때 등온흡착선이 다른 만큼 터보분자 펌프(TMP)와 같은 기계식 펌프에 비해 배기속도의 기체별 의존성이 판이하고 기체별 배기용량도 차이가 많을 수 있다. 또 크라이오펌프는 냉동기 및 활성탄 패널의 재료특성상 70℃ 이상의 가열이 불가능하므로 평상시 물의 표면방출이 많은데 이를 극복하기 위해 가열이 가능한 특수한 방식들이 개발되고 있지만 일반적인 크라이오펌프로 어느 정도 도달압력을 얻을 수 있는지도 관심거리가 아닐 수 없다.

크라이오 펌프는 가격대비 배기속도가 큰 펌프로 같은 흡기구 크기에서 TMP의 두배에 가까운 배기속도를 나타낸다. 하지만 기체를 흡착하여 내장하는 펌프이므로 배기용량에 한계가 있고 때때로 재생이 필요하므로 사용상 번거로움이 있을 수 있다. 수소를 배기하고 있을 때는 펌프가 불의의 정지 및 대기개방시 폭발한계농도(~1.7%)를 넘지 않도록 배기량을 제한할 필요가 있다.

본 논문에서는 연구실과 산업현장에서 가장 널리 사용하는 G-M 냉동기 부착형 상용 크라이오펌프의 진공특성에 대해서 조사하기 위해 수소, 중수소, 질소, 이산화탄소, 알곤, 헬륨을 사용하여 배기속도와 배기용량을 측정하였다. 성능조사에는 PNEUROP

규격을 일부 참조하였다 [1]. 크라이오펌프 사용 전후 및 도달압력 근방에서 잔류기체의 변화특성에 대해서도 조사했다.

2. 실험장치 및 절차

이 실험에 사용한 장치는 그림 1과 같다. 이 장치의 구성에 대해서는 이미 다른 문헌에[2] 기술되어 있으므로 자세한 내용은 생략하고 이 실험 당시의 진공특성만을 간단히 요약한다.

용기는 200℃로, 크라이오 펌프(Leybold 사 RPK900, 질소배기속도 800 L/s)는 65℃로 48시간 가열한 후 상온에서 TMP로 장치를 10⁻¹⁰ mbar 대로 배기하고 크라이오 펌프를 가동하여 100 시간 정도 지난 후 3×10⁻¹¹ mbar에 도달했다.

실험은 통상 10⁻¹⁰ mbar 대에서(수소가 잔류기체의 주를 이루고 있다) 기체를 도입하면서 10⁻⁶ mbar 보다 낮은 압력에서는 오리피스법으로, 그보다 높은 압력에서는 유량계를 사용하여 배기속도를 측정했다. 압력측정은 회전식 점성진공계(SRG)로 교정한 인출형 진공계를 사용했다. 한 기체도입이 끝나면 펌프의 가동을 정지하고 65℃로 몸체를 가열하여 펌프를 재생했다.

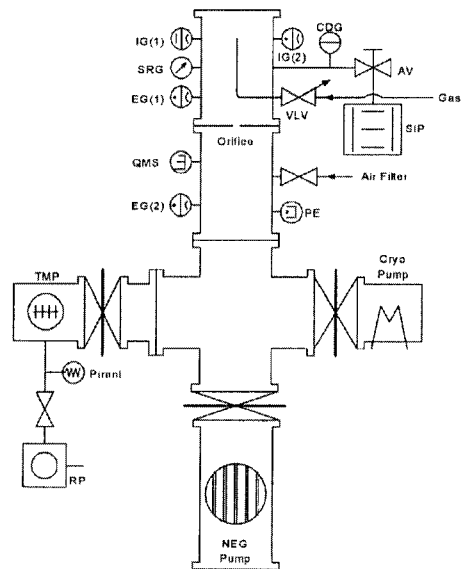


그림 1. 크라이오펌프 성능시험 장치 개략도.

장치의 목적상 여러 고진공 펌프들을 같이 달아서 써야 했으므로 크라이오펌프만 바로 직결할 수가 없었기 때문에 표준용기와 크라이오펌프 사이에 십자도관을 중간에 넣었고 도관의 콘덕턴스를 보정하여 최종 배기속도를 계산했다.

3. 잔류기체의 변화

크라이오펌프를 가동한 후 잔류기체분석기(RGA)로 측정된 잔류기체 스펙트럼의 대표적인 변화를 그려보면 그림 2와 같다. 수소를 제외한 대부분의 기체는 크라이오펌프 가동 직후부터 빠르게 감소하는데 특히 물의 감소가 가장 빠른 편이다.

냉동기 2 단의 온도가 25 K 정도가 되면 수소의 배기가 시작되면서 분압이 급격히 줄어들고 TMP 쪽 밸브를 닫아 차단하면 물의 분압이 다시 크게 줄어든다. $10^{-10} \sim 10^{-11}$ mabr 대에서 TMP가 물의 방출원이 되고 있음을 알 수 있다. 크라이오펌프도 낮은 가열온도 때문에 물의 방출원이 되기는 하지만 온도가 매우 낮아 물의 방출 자체가 적고 물에 대한 배기속도가 워낙 커서 분압이 낮아진다. 2단의 온도가 시간이 지날수록 낮아지면서 기체에 따라 감소가 빨라지는 시점이 약간씩 다른 것을 알 수 있다.

그림에서처럼 많은 경우 크라이오펌프 정상가동 후 얼마동안은 질량 16번이 제일 높이 나오는데 이것은 CH_4^+ 도 일부 있지만 특정기체보다는 물(18),

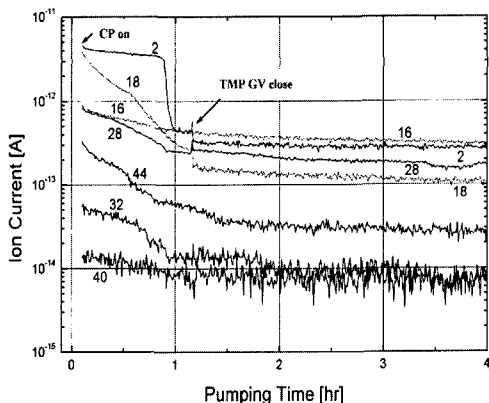


그림 2. 배기중 대표적인 잔류기체 스펙트럼의 변화.

일산화탄소(28), 산소(32), 이산화탄소(44) 등이 RGA 이온원 안에서 해리되면서 나온 산소이온(O^+)이 주를 이루고 있는 것으로 보인다. 이는 본 실험도중 유사한 여러 측정에서 CH_4 의 존재를 나타내는 15번이 16번의 1/100 정도인 것을 보아 알 수 있다. 물론 시간이 흘러 10 시간정도 지난 후에는 수소가 가장 큰 값을 나타낸다.

4. 배기속도 측정 결과

배기속도는 압력을 점점 증가시켜 가면서 측정했는데 압력에 대한 의존성보다는 흡착량에 따른 의존성이 크게 나타나서 일반적으로 시간이 지남에 따라 계속 감소하는 경향을 보였다.

그림 3과 그림 4는 각각 수소와 중수소 및 질소와 일산화탄소의 배기속도를 흡착량의 함수로 나타내고 있다. 모든 기체에 대해 흡착량이 증가함에 따라 배기속도가 서서히 감소하는 양상을 보이지만 특히 수소류는 특정 흡착량이 되면 급격히 배기속도가 감소하는 특이한 경향을 나타낸다.

수소의 배기속도가 초기에 작은 흡착량일 때는 1500 L/s 정도의 값을 나타내지만 곧 급격히 줄어들어 750 L/s 정도의 값을 유지한다. 중수소는 수소와 부착계수는 비슷한 반면 질량이 2 배 큰 만큼 배기속도가 30% 이상 적게 나온다. 중수소의 초기 배기속도는 약 950 L/s이고 정상상태에서는 약 420 L/s이다.

질소와 일산화탄소는 기본적으로 비슷한 배기특성을 나타내는데 이들 응축성 기체들은 15 K 냉각판 금속면에 주로 쌓이면서 얼음이 점점 자라나 수 cm 두께가 되어도, 얼음이 온도가 높은 물체에 닿지 않는 한 배기속도가 크게 줄어들지 않는 것으로 알려져 있다 [3]. 배기속도는 질소가 약 400 L/s이고 일산화탄소는 약 500 L/s이다.

그림 5는 불활성기체인 알곤과 헬륨의 배기속도를 그린 것이다. 물리적 흡착에 의존하는 크라이오펌프에서 알곤은 질소 등과 유사한 경향을 보이는데 배기속도는 약 375 L/s이다. 크라이오 펌프는 끓는점이 4.2 K인 헬륨에 대해서도 300 L/s 정도의 상당한 배기속도를 유지한다.

상용 크라이오펌프의 배기특성 분석

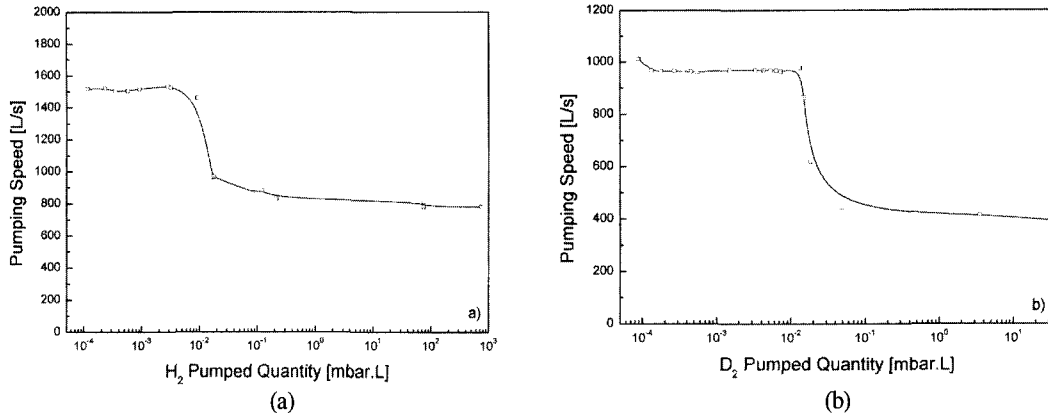


그림 3. (a) 수소 및 (b) 중수소의 배기속도 변화.

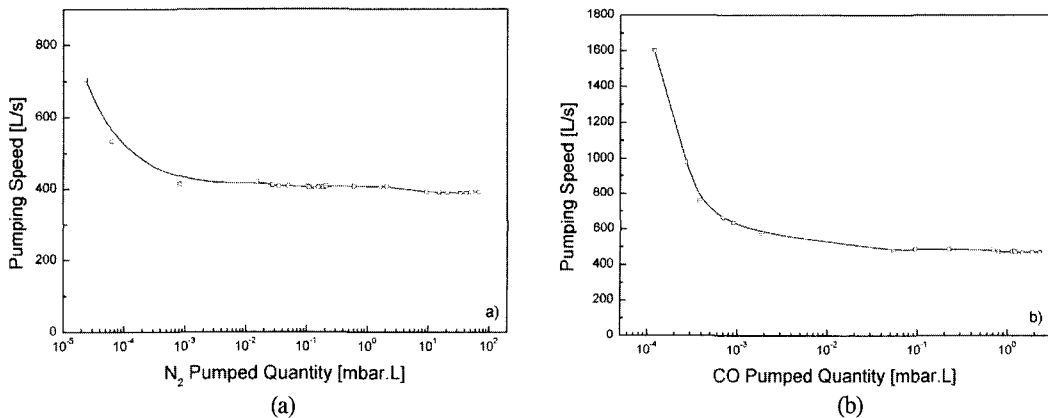


그림 4. (a) 질소 및 (b) 일산화탄소의 배기속도 변화.

5. 배기용량 측정 결과

배기용량은, 응축이 일어나는 경우, 예를 들어 질소 또는 알곤 얼음의 열전도 감소에 따른 표면온도 상승보다는 얼음이 주위 벽 특히 배플에 닿음으로써 증발하는 것 때문에 제한된다. 크라이오 펌프는 알곤, 일산화탄소, 질소 등에 대해서 비슷한 특성을 나타낼 것이므로 질소의 배기용량만을 측정했다. 그림 6은 크라이오펌프가 정상적인 동작을 하지 않을 때까지 질소의 배기속도를 측정한 것이다. 질소를 약 3.5×10^5 mbar.L 만큼 넣었을 때 급격한 압력 상승과 함께 펌프에 달려 있는 안전밸브(burst disk 형)가 파괴되었다.

흡착이 일어나는 경우에는 활성탄 표면에 한 두 층 정도 붙으면 더 이상 흡착이 일어나지 않으므로 활성탄의 실표면적이 배기용량을 결정한다. 사고의 위험 때문에 수소는 ~ 750 mbar.L까지만 실험을 했고 배기속도는 눈에 띄게 줄어들지는 않았다. 헬륨도 ~ 750 mbar.L에서 배기속도가 약 40% 감소했지만 더 이상 실험을 계속하지는 않았다.

6. 실험결과에 대한 고찰

그림 3에서 수소 및 중수소의 배기속도가 특정 흡착량에서 갑자기 줄어드는 이유는 수소가 배플을 통과한 후 배플을 직접 쳐다보고 있는 15 K 금속면

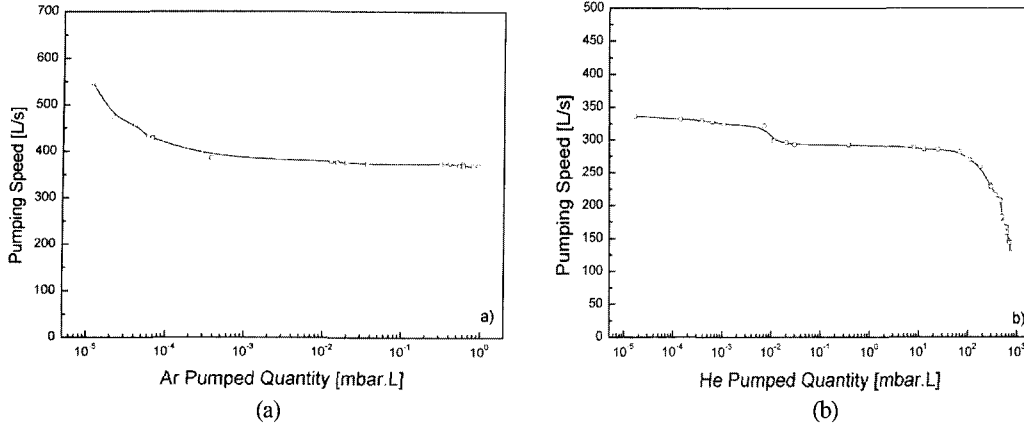


그림 5. (a) 아르곤 및 (b) 헬륨의 배기속도 변화.

에 먼저 몇 원자층 정도로 흡착되고 난 후 활성탄면에 흡착되기 시작하는 것으로 이해할 수 있다. 그림 5에서 헬륨의 배기속도 그래프에도 작지만 비슷한 현상이 발견된다. 이를 좀 더 구체적으로 살펴보면 수소의 응축에너지는 약 0.009 eV인 것에 비해 금속면이나 활성탄에의 흡착에너지는 약 0.08 eV이므로 [4] 상온에서는(참고로 상온에서 열운동 에너지는 약 0.025 eV) 응축뿐만 아니라 흡착도 일어나기 힘들지만 온도가 15 K 라면 응축은 여전히 힘들어도 흡착은 가능하다는 결론에 도달한다. 또 헬륨은 응축에너지가 0.0008 eV이고 금속 또는 활성탄에의 흡착에너지가 0.027 eV 정도로 15 K 정도면 응축은 불가능해도 흡착이 가능하다.

그림 3 및 5에서 수소와 중수소 및 헬륨 모두 약 1×10^2 mbar.L에서 배기속도가 급격히 줄어드는데(참고로 20°C에서 1 mbar.L는 2.47×10^{19} 분자에 해당한다) 이는 상온에서 약 2.4×10^{17} H₂, D₂ 또는 He 분자에 해당하고 2 단 냉각판 외면의 면적을 300 cm²라고 하면 8×10^{14} 분자/cm²로 두 원자층 정도에 해당함을 알 수 있다. 참고로 질소의 경우는 응축에너지가 0.06 eV이므로 15 K 금속면에 응축이 쉽게 일어난다.

한편 그림에서 나타난 배기속도의 변화는 15 K 금속면까지의 콘덕턴스와 안쪽 활성탄면까지의 콘덕턴스가 많은 차이가 나기 때문에 발생한다. 이를 다음과 같이 정성적으로 검토해보면 대체적인 배기 특성을 어느 정도 유추할 수 있다. 상온에서 크라이

오펌프 흡기구(직경 145 mm)의 입구 콘덕턴스는 질소에 대해 1958 L/s이고 수소에 대해서는 7325 L/s이며 헬륨은 5180 L/s이다. 흡기구의 루버(Louvre)형 배플을 통과한 기체분자는 벽과 충돌을 계속하면서 15 K 패널 금속면 및 열차폐에 부딪히기도 하고 배플을 통해 다시 되돌아 나가기도 하며 일부는 패널과 열차폐 사이의 틈을 통해 활성탄이 있는 안쪽 공간으로 들어가지도 한다. 정확한 값은 아니지만 배기속도의 경향을 상대적으로 추산하기 위해 펌프 내부 통로의 콘덕턴스를 고려하지 않으면 어떤 특정 부분에 달라붙을 확률을 흡착계수(sticking coeff.)를 고려한 가중 면적비로(그림 7 참조) 가정할 수 있다.

크라이오펌프 내부를 실측한 결과 그림 7과 같은 모델에서 배플의 단면적 A₁=165 cm², 15 K 패널의

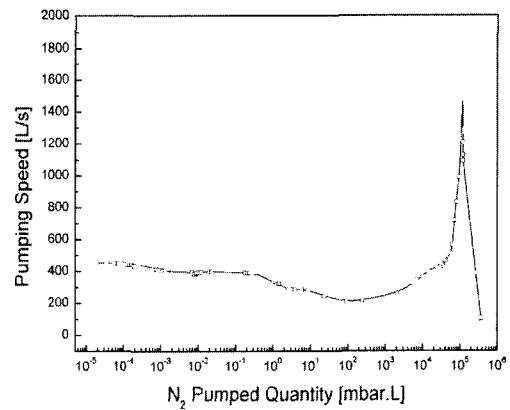


그림 6. 질소의 배기용량 측정.

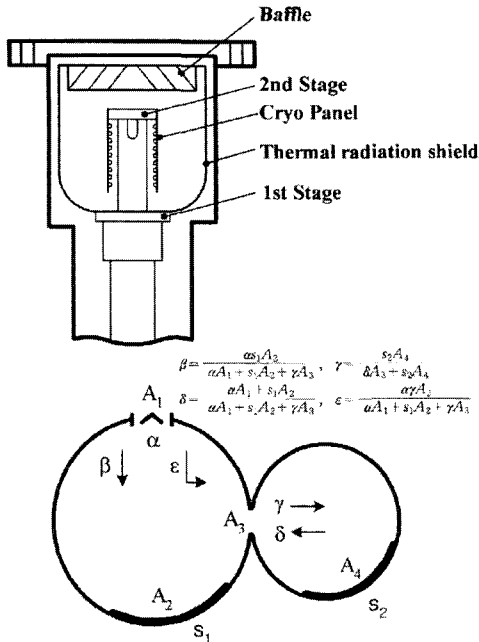


그림 7. 크라이오펌프 구조도 및 배기속도 계산 모델. $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ 은 각각 배플의 통과확률, 펌프 흡기구에서 불 때 A_2 면 (15 K 금속면)에 부착할 확률, 안쪽 공간으로 들어간 입자가 A_4 면(활성탄면)에 부착할 확률, 안쪽에서 바깥쪽으로 나온 입자가 금속면에 부착하거나 밖으로 빠져나갈 확률, 펌프 흡기구에서 불 때 A_4 면에 부착할 확률 등이다. γ 와 δ 는 반복계산(iteration)에 의해 값을 구할 수 있다. 금속면이 포화되면 $s_1=0$ 이다.

면적 $A_2=300 \text{ cm}^2$, 패널과 펌프몸체간 틈새의 단면적 $A_3=90 \text{ cm}^2$ 의 값을 갖는다. 패널 안쪽 활성탄이 도포된 면적 A_4 는 약 185 cm^2 이다. 루버형 배플의 통과확률 α 는 0.5 정도이다. 금속면 및 활성탄에 대한 응축 또는 흡착계수 s_1 및 s_2 가 질소에 대해 1 [5], 수소에 대해서는 0.6이라 [6] 하고 그림의 식에 값들을 대입하면 패널 바깥면에 부착할 확률 β 는 질소가 0.34, 수소는 0.285가 된다. 따라서 15 K 금속면에 대한 질소의 배기속도는 660 L/s, 수소의 배기속도는 2100 L/s로 예상된다. 같은 방법으로 수소가 활성탄면에 흡착할 확률 ϵ 은 0.085이고 수소의

활성탄면에 대한 배기속도는 620 L/s로 계산된다. 따라서 수소의 초기 배기속도는 약 2700 L/s에 달하는 것으로 계산된다. 질소도 항상 패널 안쪽 면에 응축할 수 있는데 흡착확률이 0.071로 계산되므로 이 때의 배기속도는 약 140 L/s로 계산되고 총 배기속도는 800 L/s로 추산할 수 있다.

수소의 경우 금속면이 포화된 후에는 활성탄면에만 붙게 되는데 이때 부착확률은 0.21이고 배기속도는 1560 L/s로 계산된다. 또 헬륨의 7.5 K 활성탄면에서의 흡착계수를 0.17로 구한 논문을 참고하여 [7] 15 K 활성탄면에서의 흡착계수는 0.1이라고 가정하면 부착확률이 0.09로 배기속도는 460 L/s로 계산된다.

그림 4에서 질소와 특히 일산화탄소 및 그림 5에서 알곤은 초기에 잠깐동안 높은 배기속도를 보이고 곧 감소하는데 그 이유는 소량의 기체가 열차폐에 흡착하기 때문이라고 추측이 되지만 분명치 않다.

그림 6에서 질소가 약 $3.5 \times 10^5 \text{ mbar.L}$ 의 배기용량을 나타냈는데 15 K 패널의 면적이 300 cm^2 일 때 질소 단원자층의 입자밀도가 $8 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 이고 한 층의 두께가 3.5 \AA 정도 되며 두께 1 cm당 응축량은 $1.5 \times 10^7 \text{ ML(monolayer)}$ 또는 $1.5 \times 10^5 \text{ mbar.L}$ 정도 되므로 얼음의 두께가 2.4 cm 이상 되었을 때 배플에 닿았을 것으로 추정된다.

활성탄은 특별히 화학적 흡착을 일으킨다거나 물리적 흡착력 자체를 크게 향상시켜 주는 것은 아니고(금속면에서의 흡착에너지와 활성탄에서의 흡착에너지는 비슷한 수준이다) 흡착 표면적을 기하학적인 면적에 비해 엄청나게 증가시킴으로써 실용적인 배기용량을 확보한다. 보통 상용 크라이오펌프에서 활성탄의 도포 밀도는 500 g/m^2 정도이고 활성탄 세공의 실표면적은 $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ 정도 되므로 면적이 185 cm^2 일 때 단원자층당 약 $\sim 3000 \text{ mbar.L}$ 의 흡착이 가능하다. 수소와 헬륨의 흡착량을 750 mbar.L 정도까지 실험했으므로 수치상으로 아직 여유가 충분히 있지만 활성탄의 세공입구에 기체분자들이 달라붙어 통로를 막을 수도 있다는 것을 염두에 두지 않으면 안된다. 한 실험결과에 의하면 [8] 활성탄 패널의 온도가 15 K보다 낮으면 오히려 배기용량이 줄어드는데 그 이유는 세공입구가 낮은 온도에서 더 잘 막히기 때문인 것으로 설명하고 있다. 따

라서 활성탄의 세공면적을 100% 활용하는 것은 사실상 불가능하다는 것을 고려한다면 특히 헬륨의 경우 이 정도 흡착량에서 벌써 배기속도가 떨어지는 것을 이해할 수 있다.

앞서의 실험결과를 정리하면 표 1과 같다. 이 표에서는 펌프 제작자가 제시한 표준사양이 같이 비교되어 있다. 상대적인 경향은 비슷하지만 본 실험 결과는 제시된 사양에 비해 다소 낮은 값들을 나타내고 있다. 이런 결과는 사용한 크라이오펌프가 원래보다 성능이 저하된 것에 기인한 것이다. 이 실험에 사용한 크라이오펌프는 사용시간이 9000 시간을 넘어서서 냉동기의 디스플라이어(displacer)를 교체해야 하는 상태에 있었기 때문이다.

표 1. 크라이오펌프 성능의 요약.

		Leybold	Exp.
Pumping Speed (L/s)	H2O	2,600	-
	H2	1,000	750
	D2	-	420
	N2	800	400
	CO	-	500
	Ar	640	375
	He	300	300
Pumping Capacity (mbar.L)	H2	3,500	>1,000
	Ar	270,000	-
	N2	-	350,000
	He	-	~1,000

그림 6을 보면 후반부에 배기속도가 몇 배 증가하는 현상을 보이고 있다. 크라이오펌프를 아주 높은 압력에서 가동시키면 오히려 배기속도가 커지는 것으로 알려져 있는데 [5] 응축이 일어날 때 응축면의 온도에 따라 증기압이 크게 변하는 것과 연관이 있다. 응축면의 온도가 어떤 기체의 용융온도보다 낮아도 용기의 압력이 증기압(또는 평형압력)에 가까워지면 응축량 만큼 증발이 일어나므로 배기속도는 0으로 떨어진다. 반대로 압력이 평형압력보다

훨씬 높아지면 증발량에 비해 응축량이 커지고 또 온도가 높은 면에도 흡착이 되기 시작하므로 배기속도가 커질 수 있다. 실험에 사용한 크라이오펌프에서 온도분포 측정이 이루어지지 않는 것으로 이런 현상이 구체적으로 어디에서 일어났는지는 단언할 수 없다.

7. 결 론

상용으로 시판되고 있는 냉동기 부착형 크라이오 펌프의 여러 기체에 대한 배기특성을 조사했다. 수소 및 중수소, 헬륨, 알곤, 질소, 일산화탄소의 배기속도를 측정하고 질소의 배기용량을 측정하였다. 또 크라이오펌프로 배기할 때 시스템의 잔류기체의 변화에 대해서도 조사했다.

수소의 배기속도는 초기에 1500 L/s에서 750 L/s가 되었으며 중수소는 초기에 950 L/s, 정상상태에서 420 L/s가 되었다. 질소, 일산화탄소, 알곤의 배기속도는 각각 400 L/s, 500 L/s, 400 L/s 정도이었고 헬륨의 배기속도는 300 L/s이었다.

질소의 배기용량은 3.5×10^5 mbar.L로 측정되었고 수소, 중수소, 일산화탄소, 알곤 및 헬륨은 흡착량이 각각 750 mbar.L, 30 mbar.L, 2.2 mbar.L, 1 mbar.L, 750 mbar.L일 때까지 실험을 했다.

참 고 문 헌

- [1] PN5ASRCC/5, Vacuum pumps - Acceptance test.
- [2] 박미영, 인상렬, 한국진공학회지 **10**, 312 (2001).
- [3] P. D. Bentley, Vacuum **12**, 145 (1980).
- [4] 山科俊郎, 廣火田優子, 眞空工學, 共立出版, 75 (1991).
- [5] K. M. Welch, *Capture Pumping Technology*, (Pergamon, 1991).
- [6] Y. Oka *et al.*, Fus. Eng. and Des. **31**, 89 (1996).
- [7] C. Day and A. S. Ferrero, Vacuum **53**, 253 (1999).
- [8] Dakin 사, private communications.