

## 대용량 크라이오 펌프의 수소 흡착특성

인상렬† · 김태성

한국원자력연구소 핵융합연구팀  
(논문접수일 : 2005년 4월 1일)

### Hydrogen adsorption properties of the large cryosorption pump

S. R. In†, T. S. Kim

*Nuclear Fusion Research Lab., Korea Atomic Energy Research Institute*

(Received April 1, 2005)

#### 요 약

중성입자빔 가열장치의 이온원과 빔라인 부품들을 개발하고 시험하기 위해 제작한 부피  $60\text{ m}^3$ 의 시험설비에 특성 비교를 위해 몇 가지 다른 방식으로 제작된 대용량 크라이오 흡착펌프를 장착하여 사용하고 있다. 크라이오 펌프의 활성탄 패널을 냉각시키면서 수소를 적절한 간격으로 도입하여 수소 분압을 측정하고 그 시간적인 변화를 통해 온도에 따른 수소흡착과 방출특성을 분석해 보았으며 관련 파라미터 사이의 상호 영향에 대해 알아 보기 위해 시뮬레이션을 수행했다.

주제어 : 크라이오 흡착펌프, 수소 흡착, 평형압력, 시뮬레이션

#### Abstract

Pumping performance of large cryosorption pumps of different types installed on the  $60\text{ m}^3$  test stand for developing and testing ion sources and beam line components of the NBI system was investigated. Hydrogen adsorption and desorption characteristics of the cryosorption panels were analyzed using the temporal change of the hydrogen spectrum obtained with short introduction of the hydrogen gas as cooling the panel, and simulations on the mutual influence between related parameters were also carried out.

**Key Words** : cryosorption pump, hydrogen adsorption, equilibrium pressure, simulation

### 1. 서 론

중성입자빔 가열장치의 이온원과 빔라인 부품들을 개발하고 시험하기 위해 제작한 부피  $60\text{ m}^3$ 의 시험설비는  $2.7\text{ MW}$ 의 수소 중성빔을 만들기 위해 수소 유량이 수천 sccm에 달하면서도 용기의 압력을  $10^{-5}\text{ mbar}$  내에서 유지해야 하기 때문에 국내에

서 제작한 공칭  $100,000\text{ L/s}$ 의 대용량 크라이오 흡착펌프 4대를 내장하고 있다. 흡착형 크라이오펌프는 헬륨 냉동기를 이용하여 극저온으로 냉각시킨 패널에 도포되어 있는 다공질의 활성탄 세공 표면에 기체분자들을 물리적으로 흡착한다. 보통  $25\text{ K}$  이하가 되면 수소의 흡착이 가능하지만 통상  $15\text{ K}$  정도를 유지한다.

잘 알고 있는 대로 흡장형 펌프의 하나인 크라이오 펌프는 유화산 펌프나 터보분자펌프와 같은 배출형 펌프와 달리 다소를 불문하고 이미 배기한 입자들의 재방출을 피할 수 없다. 따라서 도달압력은 흡착되어 있는 물질의 증기압 또는 평형압력에 의해 주어진다. 평형압력은 비단 도달압력에만 영향을 미치는 것이 아니라 배기속도에도 직접적인 영향을 미친다. 흡착되었던 기체의 방출은 실질적인 배기속도 값을 감소시키기 때문이다. 따라서 용기의 압력이 점점 낮아져 평형압력에 가까워질수록 실질적인 배기속도는 0으로 감소할 수밖에 없다. 물론 이런 현상은 어떤 고진공 펌프에서나 나타나는 것이지만 대부분 기체분자의 운동이나 충돌 등 동역학적 현상에 그 원인이 있어서 작동압력에만 의존하므로 일정한 배기속도를 유지하는 구간이 넓으며 배출량에 상관없이 지속되는 것에 반하여 크라이오 펌프는 패널온도와 흡착량에 따라 어떤 압력에서도 포화될 가능성이 있다는 점이 다르다.

흡착펌프의 배기속도와 도달압력은 활성탄 특유의 등온흡착선(isotherm)에 의해 결정되므로 (등온흡착선은 특정온도에서 기체종류 및 흡착량에 따른 평형압력 곡선으로 활성탄의 종류와 성상에 따라 천차만별이다) 그때그때의 흡착량에 따라 같이 변화한다. 금속판에 응축된 수소의 증기압은 3.8 K 정도가 되어야  $10^{-7}$  mbar로 낮아지는데 반해 20 K의 활성탄에는 150 mbar · L/g 정도로 수소가 다량 흡착되었을 때 같은 정도의 평형압력을 나타낸다. 따라서 응축형 크라이오펌프는 수소를 한 번이라도 배기한 순간부터는 용기압력이 수소의 평형압력에서 크게 벗어날 수 없지만 흡착형의 평형압력은 일반적으로 매우 낮기 때문에 온도가 높거나 흡착량이 과도하지 않는 한 용기압력이 수소 분압에 의해 좌우되는 경우는 드물다.

크라이오 펌프에서 배기속도가 가장 중요한 성능지표이지만 흡장형 펌프이니만큼 배기용량도 이에 못지않게 중요하다. 이때 배기용량은 펌프의 배기량이 늘어나면서 평형압력이 높아져 사용압력을 원하는 값으로 더 이상 유지할 수 없는 시점까지의 총 흡착량으로 결정될 수 있다. 펌프의 배기용량이 활성탄 단위질량당의 흡착량으로 주어지므로 활성탄의 도포 두께와 밀도 등에 의해서도 좌우된다.

배기용량에 미치는 또 하나의 요인은 소위 수소 폭발 한계인데 불의의 사고로 대기유입이 있을 때 수소농도가 1.7% 이하가 되도록 하려는 것이다. 용기의 크기에 따라 크라이오 펌프의 배기용량이 평형압력보다 수소폭발 한계에 의해서 주어지는 경우도 많지만 이에 대해서는 생략한다.

크라이오 펌프 제작시 가장 신경을 쓰는 부분은 물론 극저온 환경에서 내구성 있는 활성탄 패널을 만드는 것이지만 실용적인 면에서 가장 고민을 하는 부분은 열차폐에 관한 것이다. 열차폐 정도에 따라 패널의 도달 온도가 결정되고 때에 따라서는 배기작용을 하지 못할 수도 있기 때문이다. 반면에 열차폐를 완벽하게 하기 위해 입자의 통로를 다 막을 수는 없으므로 적절한 타협이 필요하고 사용하는 냉동기의 냉동능력과 실제로 배기작용이 가능한 온도 상한치를 고려해서 패널 온도의 목표치를 합리적으로 설정하는 것이 요구된다.

본 논문은 흡착패널을 냉각해 가는 동안 적절한 간격으로 수소를 도입하면서 측정된 수소 분압의 변화를 통해 온도에 따른 수소흡착과 방출특성을 분석해 보고 어떤 파라미터가 어떤 물리적인 영향을 미치는지 알아보기 위해 시뮬레이션을 병행했다. 우선 간단한 입자 평형식에 실험 데이터를 입력하여 온도에 따른 배기속도, 흡착량 등의 변화를 계산해 보고 또 알려져 있는 대표적인 등온흡착선과 기본적인 운전조건을 사용하여 압력변화를 계산하고 실험 결과와 비교해 보려고 한다. 시뮬레이션 방법을 개발하려는 목적은 제작한 크라이오 펌프의 작동에 관련된 파라미터들의 상호관계를 파악하는 것 외에 온도차, 활성탄 손실 등 현실적으로 존재하는 문제점들이 성능에 미치는 영향에 대한 간편한 분석도구를 마련하려는 것에도 목적이 있다. 사용 중인 크라이오 펌프의 성능향상과 KSTAR NBI 장치용의  $10^6$  L/s 급 대용량 크라이오 펌프의 본격적인 개발을 위해 다른 제작 방식의 비교와 성능예측 방법을 정립하는 것도 중요한 목적중 하나다.

## 2. 크라이오 흡착펌프 특징 및 특성시험

NBI 진공탱크에 내장되어 있는 크라이오 펌프는 상용 크라이오 펌프와 기본구조는 같지만 열차폐체

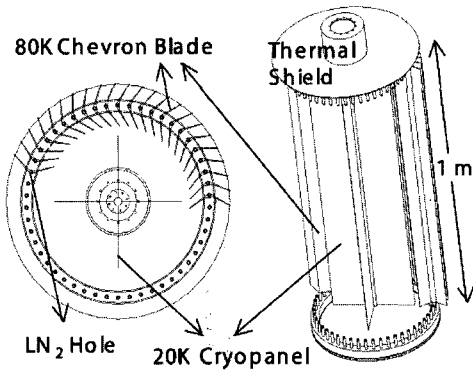


Fig. 1 Structure of cryosorption pump.

검 흡입구로 기능하는 배플이 원통벽을 이루고 있고 그 내부 중심축을 따라 십자형 활성화된 패널이 놓여져 있어서 배플을 통과한 기체분자가 활성화된 패널에 직접 입사되므로 무엇보다도 최대의 배기성능을 지향한다는 특징이 있다 [1]. 그림 1은 크라이오 펌프의 단면 모습이다. 배플은 액체질소로, 활성화된 패널은 냉동기에 의해 냉각이 이루어진다. 지난 몇 년간 여러 가지 형태의 흡착 패널과 냉동기를 시험해 본 후 현재는 각각 냉동능력 10 W인 Leybold사제 RGD1245 냉동기 두 대와 Ulvac사제 R20 냉동기 (냉동능력 8 W의 R80에서 교체) 두 대를 사용하고 있으며 네 개의 동일한 형태의 패널 중 세 개는 파쇄형 국산 활성화탄을 사용하여 자체 시방에 따라 만들었고 한 개는 국내 크라이오 펌프 전문회사인 제너시스에서 펠렛형 활성화탄 등 상용 펌프에 사용되는 재료와 방법으로 제작해서 Leybold사제 냉동기 중 한 대에 설치했다.

길이가 L인 패널에 균일분포의 복사열 q가 입사되면 패널 양단의 온도차는  $\Delta T = qL^2/2k$ 로 길이의 제곱에 비례하고 재료의 열전도계수 k에 반비례한다. 측정된 온도분포와 냉동기의 냉동출력 그래프로부터 q는 약 7.5 W, k는 패널에 따라 3,500 및 950 W/m·K로 계산되었다. 같은 재료라도 온도에 따라 열전도계수가 많이 변하는데 처음부터 그 값을 정확히 알고 사용하기가 어렵기 때문에 성능보장을 위해 현재 사용 중인 패널의 유효길이는 안전하게 1 m로 만들어져 있지만 실제 측정 결과 재료에 따라 온도차가 최소 1.2도까지 낮아지므로 2 m 길이의 패널도 제작이 가능할 것으로 예측된다. 아

쉬운 것은 상용펌프 방식으로 만든 패널의 구리재료의 열전도계수가 950 W/m·K에 머물고 있어서 개선이 필요하다. 이때 패널 양단의 온도차는 4.4도로 현재 1 m 패널의 성능에는 전혀 문제가 없지만 이런 상태에서 길이를 2 m로 확장하는 것은 불가능하다.

냉동기를 가동하여 패널을 냉각하는 동안 수소를 중성화실 상류에 압력이 포화될 때까지 100 sccm씩 도입하면서 측정한 압력 값과 유량 데이터로부터 배기속도를 구해 작동상태를 그때그때 살펴보고 스펙트럼의 변화로부터 수소 흡착특성과 재방출 특성을 분석하는 작업을 수행했다. 수소도입 중 및 도입 후 수소분압의 변화는 패널의 수소 흡착과 방출특성에 관한 정보를 담고 있는 독특한 압력펄스의 형태로 나타난다. 그림 2 a), b) 및 c)는 각각 세 가지 형식의 패널에 대한 스펙트럼 변화를 보여주고 있다. a)는 파쇄형 활성화탄 패널을 Ulvac R80 냉동기에 단 것이고, b)는 펠렛형 활성화탄 패널을 Leybold RGD1245 냉동기에 달아서 실험한 것이다. 그림에서 수직축은 이온전류이지만 진공압력계의 수치도 같이 기록이 되어있으므로 압력으로서의 환산이 언제든지 가능하다.

그림을 통해 한 주기의 수소 도입 시험에서 나타나는 수소 분압의 패턴은 기본적으로 유사한 형태를 가지고 있는데 수소가 도입되면서 용기의 시정수에 따라 분압이 상승하여 일정한 값으로 포화된 후 수소 도입이 멈추면 처음에는 짧은 시정수를 가지고 줄어들지만, 압력이 어느 정도 줄어들면 정도의 차이는 있지만 감소추세가 완화되었다가 다시 급격히 줄어든다. 물론 패널의 재질과 온도에 따라 펄스의 구체적인 형태가 크게 변하며 특히 펄스폭에 많은 차이가 나타난다. 그림 a)와 b)에서는 온도가 낮아지면서 전반적인 펄스폭이 늘어났다가 다시 줄어든다.

앞의 두 패널은 모두 정상적으로 작동하는 것이지만 앞서 언급한 대로 패널 재질과 사용한 냉동기 성능이 서로 전혀 다르며, 마지막 것은 실험실 급에서 상용 급으로 개발해 나가던 패널의 초기모델로서 상용 펌프의 어레이를 모방해 만들어 본 것으로 실패한 패널의 실험결과이지만 비교를 위해 포함한 것이다. 이 어레이는 중심 축에 20장의 원판

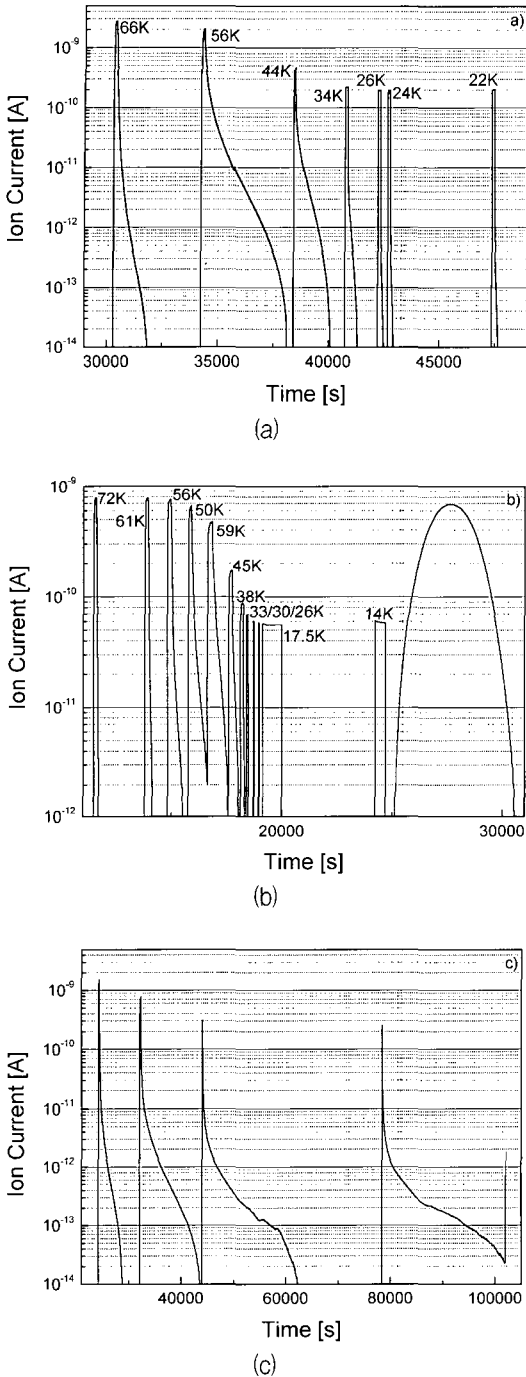


Fig. 2 Variation of hydrogen pressure as cooling the cryopanel. a) R80-old panel, b) RGD1245-new panel, c) RGD1245-array. The values written on the graphs are the lowest panel temperatures.

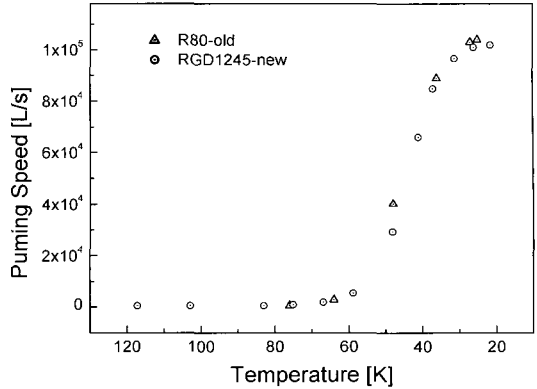


Fig. 3 Pumping speed of cryopanel vs. panel temperature.

형 패널이 꿰어져 있는 형태를 취하고 있는데 실효 면적이  $2.8 \text{ m}^2$ 로 단위 흡착량은 반 이하로 낮은 데도 불구하고 펄스폭이 수 시간에 달하는 것은 너무 집적도가 높게 제작되어 냉동기의 최대 능력으로도 패널의 온도를 평균 70 K 근방에서 더 낮출 수 없었기 때문이다. 그림 c)에서 보듯이 이때 펄스폭은 계속해서 점점 넓어지고 있다.

그림 2 b)에서 마지막 펄스는 냉동기를 끄고 패널의 온도가 상승할 때 방출되는 수소에 의한 것이다. 수소의 방출은 패널의 온도가 20 K일 때부터 시작하여 55 K일 때 가장 활발하고 70 K가 넘어서면서 멈춘다. 참고로 질소는 50 K부터 방출을 시작하여 120 K에서 피크를 이루고 150 K에서 방출이 끝나며 산소는 65 K 근방에서, 물은 115 K 정도부터 나타난다.

그림 3은 패널 평균온도의 함수로 정상적인 두 패널의 배기속도를 함께 그린 것이다. 두 패널의 배기속도 변화는 유사한 형태를 가지고 있는데 최대 100,000 L/s 근처의 배기속도를 나타냈다. 이 그림에 포함시키지는 않았지만 어레이의 배기속도는 냉각이 잘 되지 않았음에도 불구하고 최대 14,500 L/s가 기록되었다. 십자형 패널 중에서는 파쇄형 활성탄을 쓰는 것이 수% 정도 높은 배기속도를 보였지만 예상보다 큰 차이는 아니었다.

### 3. 시뮬레이션

그림 2를 이해하기 위해 먼저 수소 흡착과 방출

을 포함한 입자 평형식을 세우고 이를 풀어서 수소 분압의 변화모드를 분석해 볼 필요가 있다. 수소 도입시 분압의 변화는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V \frac{dP}{dt} = q_{ex} - SP - S_0P \quad (1)$$

이때 V는 용기의 부피로 60 m<sup>3</sup>, S<sub>0</sub>는 크라이오 펌프를 보조하는 터보분자펌프(TMP)의 유효배기 속도로 4,200 L/s이며 q<sub>ex</sub>는 수소의 도입량이다. 수소 도입이 멈추면 q<sub>ex</sub>=0이다. S는 크라이오 펌프의 실제 배기속도로 어떤 순간에 흡착되는 것과 방출되는 것의 차이로 주어진다.

$$S = \alpha A_b C_g - \beta A_p C_s \frac{P_{eq}}{P} \frac{T_g}{T_s} = \frac{1}{P} \frac{dQ_d}{dt} \quad (2)$$

이때 C는 단위 오리피스 컨덕턴스인데  $3.64 \sqrt{T/M}$  [L/s]으로 주어진다. T가 T<sub>g</sub>(기체 온도)이면 C<sub>g</sub>가, T<sub>s</sub>(패널 온도)이면 C<sub>s</sub>가 얻어진다. 또 수소의 경우 M=2이다. A<sub>b</sub>와 A<sub>p</sub>는 각각 배플 외면과 패널의 면적으로 1.7 m<sup>2</sup> 및 1.2 m<sup>2</sup>이다. 오른쪽 두 번째 항의 T<sub>g</sub>/T<sub>s</sub>는 열전이 효과가 고려된 것이다. α는 흡기구(배플표면)에 입사된 입자가 활성화된 패널에 흡착될 확률 즉 배기확률이고 β는 패널에서 방출된 입자가 펌프 밖으로 빠져나올 확률이다. Q<sub>d</sub>는 흡착량으로 SP = dQ<sub>d</sub>/dt의 관계가 있다. 흡착보다 방출이 더 많다면 dQ<sub>d</sub>/dt < 0이고 물리적으로는 안 맞지만 S < 0이다.

그림 4를 보면 사용 중인 크라이오 펌프를 모델화하여 몬테카를로 계산을 통해 부착계수에 따른 배기확률의 변화를 알 수 있다. 배기확률에는 배플 통과확률, 배플에서 패널까지 전달확률 및 부착계수가 포함되는데 단순한 곱은 아니다. 우리가 제작한 배플의 통과확률은 0.1629로 계산되므로 그림에서 알 수 있듯이 부착계수가 1일 때 배기확률이 0.1615라면 펌프 내 전달확률은 0.948이다. 배플을 통과하면 대개 패널과 한 번쯤 접촉하지만 5% 정도는 패널보다 다른 쪽 배플 내면에 먼저 부딪힌다. 실용적인 값으로서 부착계수가 0.6이라면 [2] α

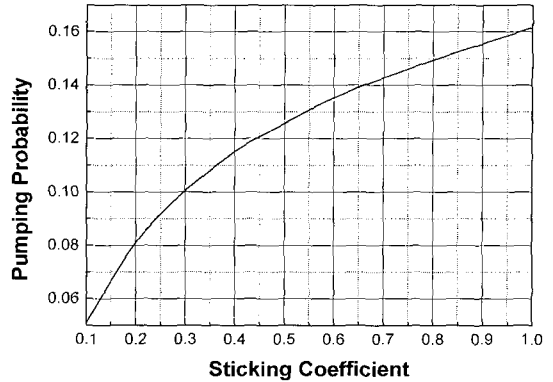


Fig. 4 Pumping probability as a function of sticking coefficient.

= 0.135이다. 이때 배기속도는 약 100,000 L/s로 계산되고 그림 3의 실측치와 잘 일치한다. β는 따로 계산하지 않아도 컨덕턴스의 무방향성이라는 기본원리에 의해 구할 수 있다. 즉 패널면적(1.2 m<sup>2</sup>) × β = 배플 외면적(1.7 m<sup>2</sup>) × 0.1615에 의해 β = 0.23 이 된다.

식 (1)의 해법은 결국 평형압력 P<sub>eq</sub>를 알아야만 가능하다. 평형압력은 온도 T<sub>s</sub> 및 흡착량 Q<sub>d</sub>의 함수인데 간단한 꼴로 표현하는 것은 어렵다. 그림 5와 같은 잘 알려진 등온흡착선으로부터 다음과 같은 함수 꼴을 만들어 낼 수 있지만 충분히 보편적이라고 할 수는 없다 [3]. 단지 흡착특성이 배기특성 및 압력변화에 어떤 영향을 미치는 가를 정성적으로 또는 준 정량적으로 알아보는 데는 도움이 된다. 식 (3)은 온도에 대한 항과 흡착량에 의존하는 항으로 구성되어 있다.

$$P_{eq} = e^{A - \frac{B}{T}} (e^{2(CQ_d^2 + DQ_d + F)} - 1)^{0.5} \quad (3)$$

식 (3)의 계수를 적절히 정하고 (예를 들어 그림 5에서는 A=6.745, B=875, C=0.2234, D=10.07, F=18.72를 얻는다 [3]) 식 (2) 및 식(1)에 대입하여 미분방정식을 수치적으로 풀면 몇 가지 패널 온도에 따라 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 특별한 언급이 없는 한 시뮬레이션은 실험조건과 유사하게 100 sccm으로 120초 동안 수소를 도입하는 조건에서 이루어졌다.

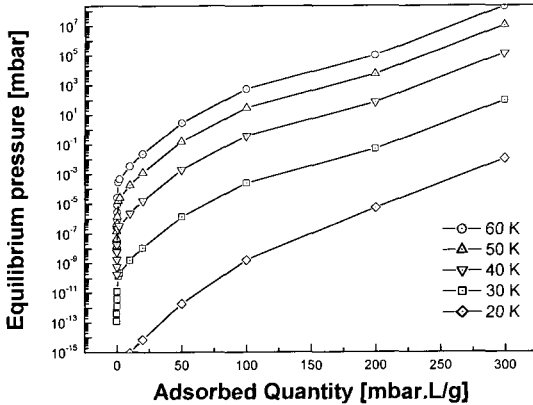


Fig. 5 Isotherm of H<sub>2</sub> on the chilled activated carbon.

활성탄 패널의 온도가 아주 높을 때는 평형압력도 높으므로 크라이오 펌프의 실제 배기속도는 0에 가깝고 배기는 TMP에 의해서만 이루어지므로 압력상승이나 하강시 모두 시정수는  $60,000 \div 4,200 = 14.3$ 초 정도가 되고 압력은 공간배기 모드로 변화한다. 패널의 온도가 점점 낮아져 평형압력도 낮아지고 크라이오 펌프도 어느 정도 배기작용이 생기면 시정수가 짧아지지만 이 효과는 압력이 상승할 때 및 수소 도입이 끝난 직후 용기압력이 평형압력 근처에 오기까지의 공간배기 모드에서만 잠깐 나타나고, 흡착되었던 수소의 방출이 시작되면서는 분압의 감소가 완만해 지고 수소가 어느 정도 소진된 후에야 압력감소가 다시 빨라진다. 온도가 50 ~ 40 K 범위 안에 들어가면 이런 현상이 더 심해져 잠깐 수소를 도입한 후에도 방출이 조금씩 꾸준히 지속되면서 오랜 시간이 지나야 기저압력으로 떨어진다.

온도가 계속 내려가 평형압력이 충분히 낮아지면 배기속도가 크게 증가하므로 압력상승 높이가 현저히 줄어들고 시정수도 아주 짧아진다. 온도가 30 K 정도를 지나면 흡착되었던 수소는 거의 방출되지 않고 시정수는  $60,000 \div 104,200 = 0.6$  초 정도가 되면서 압력의 상승과 감쇄가 순간적으로 일어난다. 이때 누설이나 다른 표면방출이 없다면 도달압력은 그 온도에서 수소의 평형압력과 같다.

이를 다시 정리해 보면 크라이오 패널의 배기작

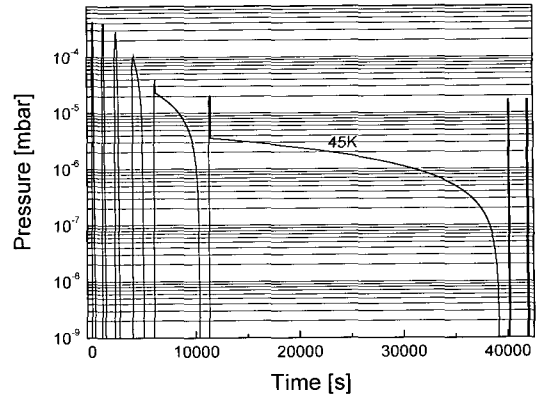


Fig. 6 Simulated pressure evolution when temperature is constant. The panel temperature is set to 80, 65, 55, 50, 45, 30, 20 K in sequence.

용이 시작되면서 1) 수소 도입시 압력상승 및 포화 시간이 빨라지고 2) 압력상승 높이는 낮아지며 3) 수소도입 후 일차 압력감소가 빨라지고 4) 압력감소 폭도 깊어지며 5) 수소방출에 의한 이차 압력펄스 폭이 넓어진다. 외형상으로 온도가 낮아지면서 펄스폭이 늘어났다가 줄어든다고 볼 수도 있지만 한편으로는 매우 낮은 온도에서도 평형압력이 미미하나마 꾸준히 줄어들어 언젠가는 수소분압이 0이 된다는 의미에서 온도가 낮아질수록 펄스폭이 넓어진다고 할 수도 있다.

#### 4. 결과에 대한 고찰

이상의 논의를 염두에 두면서 그림 2a 및 2b와 그림 6을 비교해 보자. 사실 시뮬레이션 파형과 실험에서 얻은 파형은 중요한 특징을 공유하고 있어서 압력변화의 관련 파라미터들에 대한 의존성도 공통적으로 적용될 수 있지만 상세한 부분까지 딱 들어맞지는 않는다. 제일 먼저 눈에 띄는 것은 그림 2a 및 2b에서 특히 온도가 45 K 근처일 때 정상적인 패널에 대한 실험시의 펄스폭이 계산보다 훨씬 좁다는 것이다. 이 불일치의 원인은 우선 실험에서 얻은 분압의 변화는 고정된 온도가 아니라 서서히 줄어드는 중에 얻은 것이므로 시뮬레이션 결과보다 같은 조건이라면 펄스폭이 줄어들게 마련이라는 것이다. 따라서 냉동기의 냉동능력이 다소 높은 경우인 그림 2b의 펄스폭이 비교적 더 좁게 나

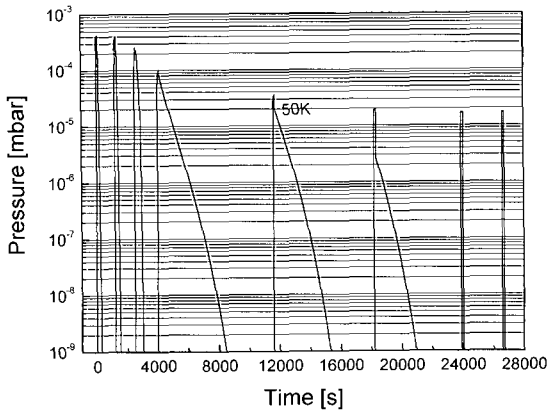


Fig. 7 Simulated pressure evolution when temperature is decreased as  $dT/dt = -0.005$  K/s. The initial temperatures are the same as those of Fig. 6.

타나는 것은 이런 이유일 가능성이 높다. 그림 7처럼 0.005도/초 꼴로 온도가 하강할 때 계산결과를 보면 용기압력이 패널의 온도하강과 이에 따른 평형압력 감소를 그대로 따라가면서 온도가 일정할 때에 비해 펄스폭이 현저히 짧아져서 좀 더 현실적인 파형이 되는 것을 알 수 있다.

실제 측정되는 수소 분압의 변화를 이해할 때 패널 양단의 온도에 차이가 있다는 점도 무시할 수 없다. 냉각이 진행되는 동안은 1m 패널 양단에 수십도의 차이가 나는 것도 보통이다. 그림 8은 이 영향을 알아보기 위해 온도가 차츰 낮아지는 것 외에 온도분포를 이차 함수 꼴로 가정하고 65 ~ 35 K, 55 ~ 30 K 및 45 ~ 20 K의 범위에서 각각 여러 온도에서의 압력 파형을 가중치를 주고 합쳐서 평균을 취한 것이다. 초기의 높은 압력상승과 깊은 하강 및 완만한 이차 감소가 실제 파형에 더 가까워지고 있다. 한편 잔류기체분석기를 높은 압력에서 가동해야 하므로 증폭비를 낮추어서 사용하고 있는데 이는 분압이 낮아질 때 일찍 감도를 잃어버려 미세한 수소 분압변화를 그대로 추적하지 못하기 때문에 실제 분압이나 시뮬레이션에 비해 측정된 압력 파형이 훨씬 빨리 감쇄하는 것으로 나오는 원인이 되고 있다.

시뮬레이션의 주된 목적 중의 하나는 일일이 실험을 통해 확인하기 어려운 다양한 운전조건에서

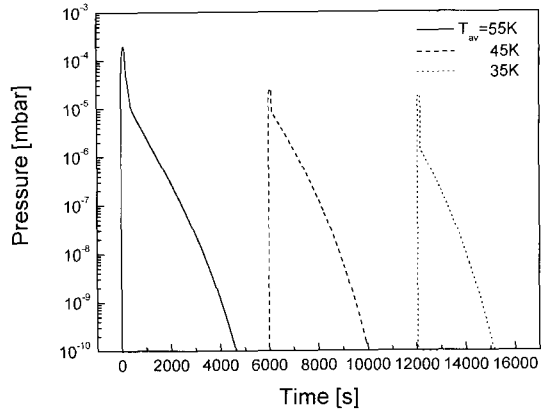


Fig. 8 Simulated pressure evolution when temperature is neither uniform nor constant, but of quadratic gradient and varied as  $dT/dt = -0.005$  K/s.

언을 수 있는 펌프의 성능을 쉽고 빠르게 예측할 수 있다는 것이다. 예를 들어 1000 sccm으로 수소 유입량이 대폭 늘어났을 때 펌프의 배기성능은 어떻게 변화해 가며 얼마나 오래 필요한 성능을 유지할 수 있을가를 알고 싶다면 시뮬레이션을 통해 그림 9a와 같은 결과를 얻을 수 있고 의문에 대한 어느 정도의 해답을 찾을 수 있다. 이로부터 만일 필요한 압력에 의해 배기속도가 50,000 L/s 이상은 되어야 한다면 50 K, 40 K, 30 K일 때 약 130초, 780초, 2760초 까지 수소도입이 가능하다는 결론을 얻을 수 있다. 20 K 라면 10,000초까지도 사용이 가능하다. 수소 분압의 변화에 미치는 수소 유량 및 흡착량의 영향을 더 자세히 보면 그림 9b와 같다. 유량을 두 배로 늘리면 온도에 무관하게 압력상승이 거의 두 배로 되는 것은 같지만 20 K일 때는 그 외에 다른 영향이 없는 것에 반해 50 K일 때는 수소도입 시간을 두 배로 하거나 이미 흡착되어 축적되어 있던 수소를 포함하는 경우 등과 유사하게 펄스폭이 약 40% 늘어난다. 평형압력이 흡착량에 따라서도 변하지만 온도의 영향이 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 한편 활성탄 재질과 성상이 다를 때 같은 수소 유량에 대해서도 단위질량당 흡착량에 차이가 생기므로 마치 유량이 그만큼 늘거나 주는 것과 같다고 추정할 수 있다. 그림 2에서 펠렛형의 활성탄 밀도가 더 높으므로 파쇄형에 비해

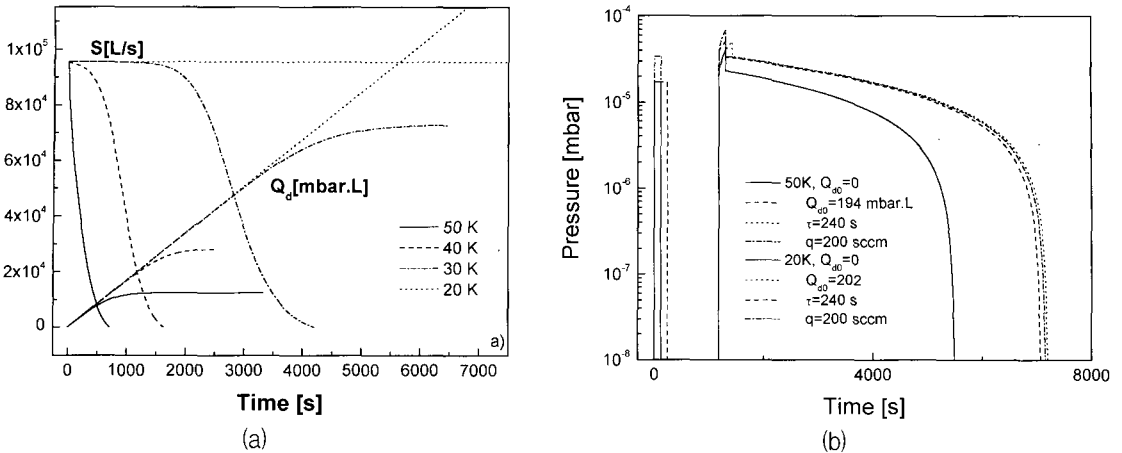


Fig. 9 a) Simulated pumping performance—pumping speed and adsorbed quantity—when  $q_{ex}=1000$  sccm. b) Simulated pressure evolution when doubling the gassing rate or duration, and taking into account initial non-zero adsorption.

펄스폭이 짧아질 또 하나의 개연성이 있다.

이제 다시 그림 2c를 보면 갈수록 펄스폭이 늘어나 마지막 측정 과정은 거의 7시간에 육박하는 것을 볼 수 있다. 어레이의 축 양단에서 측정된 온도는 최저 40 K 및 최고 88 K에서 이미 더 이상 내려가지 않고 고정되어 있었지만 디스크들의 온도는 일정 분포에 이르기까지 조금씩 더 내려가고 있거나 패널들에 흡착되어 누적된 수소 때문에 펄스가 점점 더 길어지는 것으로 해석하는 것이 가능하지만 펄스 높이가 낮아지는 것으로 보아 전자가 더 타당성이 있다. 어쨌든 그림 6에서 45 K일 때 계산한 펄스폭이 이론에만 그치는 것이 아니라는 것을 반증한다.

그림 2와 3 및 6 모두에서 볼 수 있듯이 통상 알려져 있는 크라이오 펌프의 작동온도 상한선인 25 K보다 훨씬 높은 온도에서부터 배기작용을 하는 것에 주목할 필요가 있다. 같은 온도에서 배기속도의 크기는 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 우선 배기확률 또는 부착계수와 평형압력의 상대적인 크기에 의해 결정된다. 온도가 내려가서 평형압력이 매우 낮을 때는 정해진 기하학적인 구조에서 배기속도는 활성탄의 수소에 대한 부착계수의 영향을 가장 크게 받는다. 한편 높은 온도에서 배기속도가 0으로 가는 것은 부착계수가 감소하는 것이 아니라 (이런 사실은 활성탄은 아니지만 비증발형 게터 (NEG) 실험에서 450 °C 활성화 중에 측정된 부착

계수가 상온에서 측정된 값과 다르지 않다는 점에서 이해할 수 있다 [4].) 평형압력이 높아 들쭉 향이 첫째항을 상쇄하기 때문이다. 그러나 배기속도가 평형압력 자체보다 용기압력에 대한 비에 좌우되므로 수소가 도입되는 동안에 용기의 압력이 상대적으로 높으면 온도가 높아도 흡착이 일어날 수 있다. 실험에서 100 sccm으로 수소를 도입하면서 TMP만으로 배기할 때 용기압력은  $4.2 \times 10^{-4}$  mbar를 유지한다. 식 (3)에서 패널 온도가 50 K일 때 흡착량이 17 mbar · L/g보다 높지 않으면 평형압력이 용기압력보다 낮기 때문에 이런 유량에서는 수천 초에 이르는 상당기간 수소흡착이 가능하다는 결론이 나온다.

그림 2b의 스펙트럼에 적절한 환산계수를 곱해 압력으로 환산한 후 식 (1)과 (2)를 이용해서  $Q_a/dt$  및  $Q_a$ 의 변화를 구하면 그림 10과 같다. 온도가 내려가면서 흡착량은 계속해서 차츰 늘어나는 것에 비해 방출량은 흡착이 시작되면서 처음에는 같이 증가하다가 평형압력이 아주 낮아지면서 결국 줄어들고 대신 활성탄에 점점 축적이 되는데 이 실험에서 최종 수소 흡착량은 2,950 mbar · L (~5 mbar · L/g) 정도로 계산되며 이는 실험이 끝난 후 펌프 재생기간에 방출된 수소의 양과 일치한다. 참고로 이 실험 중 TMP로 배기된 수소의 총배출량은 880 mbar · L로 계산된다.



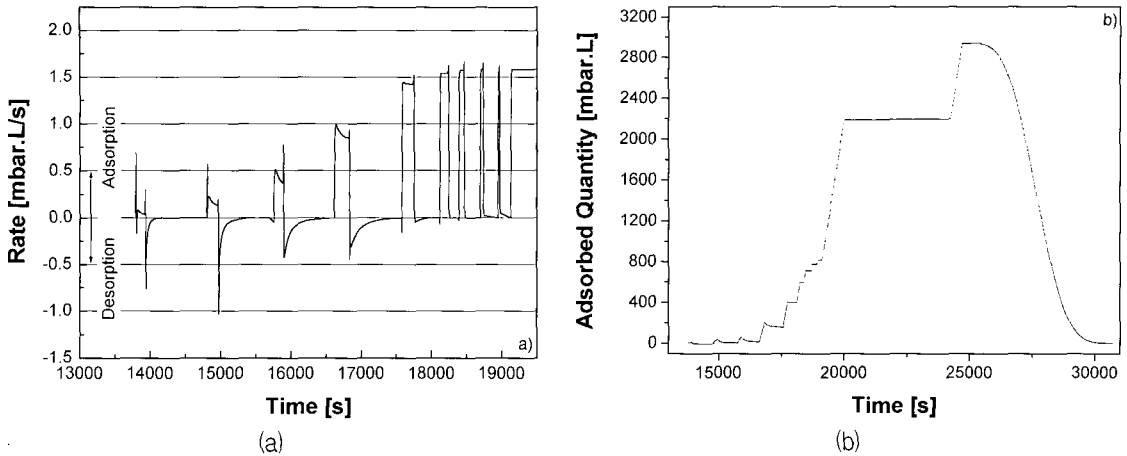


Fig. 10 a) Adsorption and desorption rate, and b) change of adsorbed quantity during successive introduction of hydrogen.

## 5. 결 론

중성입자빔 가열장치의 이온원과 빔라인 부품 시험설비에 달려있는 100,000 L/s 급 대용량 크라이오 흡착펌프의 전반적인 운전특성을 조사했다.

흡착패널을 생각해 가는 동안 적절한 간격으로 일정 유량의 수소를 펄스로 도입하면서 측정한 압력 상승 높이로부터 온도에 따른 배기속도를 구하고 몬테카를로 계산과 비교해 보았다. 또 한 주기 동안의 수소 분압 파형을 통해 온도에 따른 수소흡착과 방출특성을 분석해 보았으며 관련 파라미터의 상호 영향을 알아보기 위해 입자 평형식을 다양한 조건에서 풀어 수소 분압 파형을 재현하는 시뮬레이션을 병행했다. 실측한 배기속도와 몬테카를로 계산결과를 비교했을 때 활성탄 종류와 상관없이 수소의 부착계수가 0.6 정도로 구해졌다.

시뮬레이션에 여러 가지 현실적인 운전조건들을 고려함으로써 실험에서 얻은 수소 분압파형을 재현

할 수 있으며 패널이 가지고 있는 현실적인 한계가 성능에 미치는 영향을 분석한다든지 실험으로 일일이 확인하기 어려운 다양한 운전조건에서의 성능에 측이 가능하다. 더 정확한 계산결과를 얻기 위해서는 무엇보다도 사용 중인 활성탄에 대한 적절한 등온흡착선을 확보하는 것이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. R. In and H. J. Shim, Large cryosorption pump for the NBI test stand, *J. Kor. Vac. Sci. Technol.* **7**, 27 (2003).
- [2] 인상렬, 박미영, 상용 크라이오펌프의 배기특성 분석, *한국진공학회지* **12**, 86 (2003).
- [3] Sargent-Welch Co. Ltd., *Basics of cryopumping* (1981).
- [4] S. R. In, *et al.*, *J. Vac. Soc. Jpn.* **34**, 882 (1991).