

맥동관형 크라이오펌프 시제품 성능예측과 평가

인상렬^{a*} · 강상백^b

^a한국원자력연구원 핵융합공학기술개발센터, 대전 305-353

^b우성진공(유), 청원군 363-813

(2012년 12월 20일 받음, 2013년 2월 9일 수정, 2013년 2월 19일 확정)

맥동관형 크라이오펌프 개발 사업 2단계를 맞아 우성진공(유)을 중심으로 상용화 시제품 개발이 성공적으로 끝나가고 있다. 최종 크라이오펌프 개발품은 흡기구 직경(내경) 16.5 (14) 인치에 질소 배기속도 3,600 L/s 이상을 목표로 하고 있다. 개발품의 성능확인을 위해 우선 몬테카를로 계산을 통해 배기속도를 예측하고 구조설계를 최적화했으며 이를 바탕으로 가공 조립된 크라이오펌프 시제품의 성능을 표준화된 장치에서 표준화된 절차를 통해 평가하여 설계 목표값과 비교했다. 시제품의 질소 배기속도는 4,600 L/s로 측정되어 설계값과 잘 일치하였으며 개발목표를 훨씬 상회하였다.

주제어 : 맥동관, 크라이오펌프, 시제품, 성능예측, 평가

I. 서 론

크라이오펌프는 극저온 금속면이나 활성탄에 응축과 흡착을 통해 기체를 배기하는 펌프로 극저온 면적을 넓힘으로써 배기속도를 쉽게 증가시킬 수 있어서, 핵융합 실험장치나 가속기와 같이 대형 진공시스템에서 대용량 펌프가 필요할 때 수천~수만 L/s 용량의 펌프를 외부에 장착하거나, 심지어는 장치 내부에 수십만~수백만 L/s 용량의 펌프를 만드는 것도 가능하다. 플라즈마 응용장치들은 대부분 터보 분자펌프를 주펌프로 많이 사용하지만, 스퍼터링 장치에 주입되는 대용량 공정기체나, 이온주입기에서 전하 균형을 맞추기 위한 플라즈마 기체의 배기용으로는 크라이오펌프가 주로 사용된다.

크라이오펌프는 단위 흡기구 면적 대비 배기속도가 가장 높은 진공펌프로서, 같은 고진공 펌프로 분류되는 터보 분자펌프나 유확산 펌프와 달리 고속회전체가 없고 작동유도 필요하지 않아서 내구성이 높고 대용량에 잘 견디며 오염의 염려도 없다. 크라이오펌프는 비록 흡장형 펌프이지만 펌프가 가동되는 20 K 이하의 극저온에서는 헬륨을 제외한 모든 기체가 포집되고 아주 낮은 증기압을 나타내며 배기 용량도 충분하여 초고진공과 극고진공을 대표하는 펌프로서 손색이 없다.

상용 크라이오펌프에서 극저온을 얻는 방식에는 기계식

피스톤의 왕복운동을 이용하는 G-M 냉동기형과 기체 피스톤을 사용하는 맥동관 냉동기형이 있는데 후자에 비해 전자가 일반화되어 있다. 맥동관형은 열효율이 다소 낮은 반면 소음과 진동이 적어서 저진동을 요구하는 곳에 적합하다. 일단 냉동기가 정해지면 펌프 본체라고 할 수 있는 활성탄 어레이와 열차폐를 냉동기에 달아 크라이오펌프를 완성하게 되는데, 냉동기의 냉동능력과 펌프의 배기성능은 밀접한 관련이 있으므로 펌프 본체 설계를 냉동기에 맞추어서 최적화하는 것이 중요하다.

지식경제부가 시행하는 고진공 펌프 개발 사업의 일환으로 현재 제일진공(주)이 주도하는 2,500 L/s 급 자기부상형 터보 분자펌프와 우성진공(유)이 주도하는 3,600 L/s 급 맥동관 냉동기형 크라이오펌프 국산화가 진행되고 있는데, 크라이오펌프의 경우 4년이 끝난 지금 공칭 10/40 W 맥동관 냉동기를 완성하고 활성탄 어레이와 열차폐를 설계, 제작하여 크라이오펌프 국산 1차 시제품을 완성하고 시험평가를 완료했다. 이 시험결과를 분석한 후 미흡한 점을 2차 시제품 제작에서 해결하여 좀 더 경쟁력 있는 상용제품이 만들어지도록 하려고 한다.

본 논문에서는 크라이오펌프 국산 시제품 설계 배기성능과 시험결과를 소개한다. 성능시험을 통해 냉각시간, 재생시간, 도달압력, 배기속도, 배기용량, 최대유량, 교차(crossover) 값 및 알곤 회복시간을 측정하였고 표준 또는 비표준 규격

* [전자우편] srin@kaeri.re.kr

에서 다루는 주요 평가항목이 모두 망라되었다 [1-3].

II. 크라이오펌프 모델과 성능예측

1. 몬테카를로 배기속도 계산

앞서 언급한 대로 크라이오펌프 본체는 크게 열차폐와 활성탄 흡착 어레이로 이루어진다. 열차폐의 일부는 배플 형태로 만들어 기체분자가 통과할 수 있도록 만들어진다. 활성탄 어레이에 입자가 부착되는 확률을 높이기 위해서는 흡기구에 투사된 입자가 배플을 통과하는 확률과 어레이에 부착되는 확률을 함께 높여야 한다. 이는 서로 연관이 없는 것처럼 보이지만 실상은 그렇지 않다. 만일 배플을 입자 통과가 쉽도록 영성하게 만들면 복사열 투과도 커져서 활성탄 어레이의 온도를 높이고 이는 부착확률의 감소로 나타난다. 마찬가지로 어레이의 크기를 합부로 키우는 것도 온도 상승을 유발할 수 있다. 또 냉동기의 냉각능력도 배기성능에 영향을 끼친다. 따라서 열차폐와 어레이의 설계는 구

조적인 면뿐만 아니라 열적인 측면도 고려해야 완벽한 설계가 된다. 그러나 이는 처음부터 문제를 지나치게 복잡하게 만들어 설계를 쉽게 진행할 수 없도록 만든다.

과거 크라이오펌프는 배플을 치밀하게 만들어 복사열 투과를 엄격하게 제한하는 방향으로 만들어졌지만 요즘은 입자 통과확률은 가능한 한 높이고 복사열 투과는 최대한 허용하는 방향으로 배플을 작고 성글게 만들고 있다. 이는 크라이오펌프 성능에 영향을 미치는 물리적 요인들이 변화했기 때문이 아니라 전적으로 냉동기 냉동능력의 향상에 원인이 있다고 생각한다. 저렴한 값으로 고능력 냉동기가 만들어져서 과도한 복사열이 입사되는 환경에서도 활성탄 어레이의 온도를 기준값 이하로 유지하는 것이 가능하다. 따라서 국산 시제품의 설계에서도 냉동기 냉각능력은 충분하다는 전제 아래 펌프의 배기속도에만 집중하면서 몬테카를로 계산을 통해 목표치를 달성할 수 있는 구조설계 안을 마련하려고 한다.

크라이오펌프 본체를 형상화하여 계산 모델을 만들면 Fig. 1과 같다. 펌프 플랜지가 아니라 열차폐의 개구부가 실제적인 펌프 흡기구로 기능하며 배플은 개구부 일부를 막아 입자의 통과확률을 조절한다. 원통형 열차폐의 크기는 펌프의 외형적 크기에 비례한다고 할 수 있다. 상용제품을 기준으로 3,600 L/s 펌프는 내경이 300~325 mm 범위에 있다. 국산 시제품은 개발 사업의 목표치를 일단 상회하는 성능이 나올 수 있도록 플랜지 내경을 350 mm로 잡았다. 따라서 열차폐는 내경 330 mm를 기준으로 290 mm 및 280 mm를 같이 비교했으며 열차폐의 높이는 냉동기 길이가 정해져 있으므로 배플 높이를 포함해서 350 mm로 고정했다. 이 외에 다른 제원들을 포함하여 기준 치수들을 정리하면 Table 1과 같다. 이 기준 치수들을 중심으로 몇 가지로 값을 변화시키면서 몬테카를로 계산을 수행하여 최적 배기속도를 만들어 내는 펌프 제원을 결정한다.

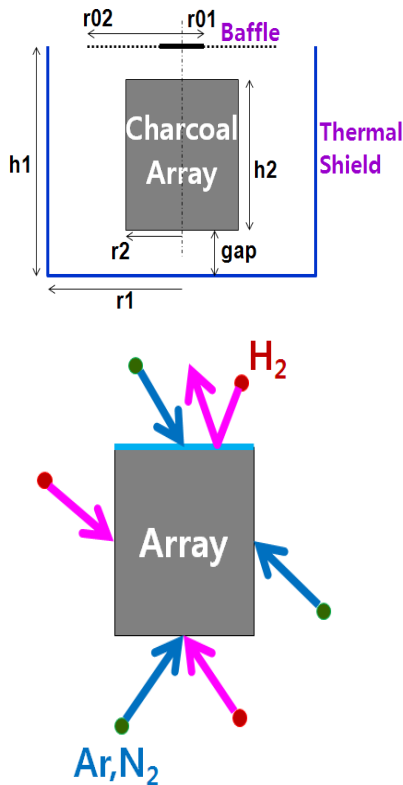


Figure 1. Cryopump model for monte carlo simulation.

Table 1. Base values of pump dimension, transmission probability and sticking coefficient. dimension is in unit of cm (refer to Fig. 1 for notations).

h1	h2	r1	r2	r01	r02	gap
30	20	16.5	8	2.5	12	5
Transmission Prob (Blade Ang. 60°)			Sticking Coeff.			
Louber	Chevron	H ₂	N ₂	Ar		
0.42	0.25	0.6	0.9	0.95		

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 배기속도 계산의 요체는 흡기구에 입사된 입자가 되돌아 나오지 않고 여러 통로를 거치면서 최종적으로 활성화탄 어레이에 흡착되는 확률 즉 배기확률을 구하는 것이다. 배플 통과확률은 이미 잘 알려져 있으므로 몬테카를로 모델에 배플 구조를 반영하지 않고 날개 각도가 60도일 때 확률 값을 바로 사용한다. 활성화탄 어레이는 여러 장의 원판들을 층층이 쌓아 만들지만 내부 상세구조는 생략하고 가상적 원통으로 대표하였다. 원판 위에서 부착 확률에 비해 가상 표면에서 부착 확률이 높기 마련이지만 부착확률이 어느 이상 커지면 값이 더 커져도 배기확률을 별로 증가시키지 않는다. 따라서 수소, 질소, 알곤의 부착확률은 실제 표면에서 기대되는 값을 사용했다. Table 1에는 계산에 사용된 확률 값들이 정리되어 있다.

Fig. 2는 펌프 흡기구-열차폐-배플의 다른 세 가지 조합에 대해 배기속도가 활성화탄 어레이의 구경에 따라 어떻게 변하는지를 그린 것이다. 질소와 알곤의 배기속도는 어레이가 커질수록 증가하는 상식적인 경향을 보이는 데 반해서 수소는 어레이 크기가 커지면 처음에는 배기속도도 같이 커지지만 어레이가 계속 커지면 배기속도는 오히려 줄어드는 비선형적 현상을 보인다. 이것은 수소의 배기속도가 큰 값을 유지하는 것이 통로에서 컨덕턴스가 크기 때문인데 어레이가 커지면 열차폐와 어레이 사이에 통로가 좁아지면서 컨덕턴스가 줄어들어 어레이에서 흡착될 확률이 커지는 이점을 상쇄한다. 물론 질소나 알곤도 이런 영향을 받기는 하지만 원래 컨덕턴스가 낮기 때문에 적어도 계

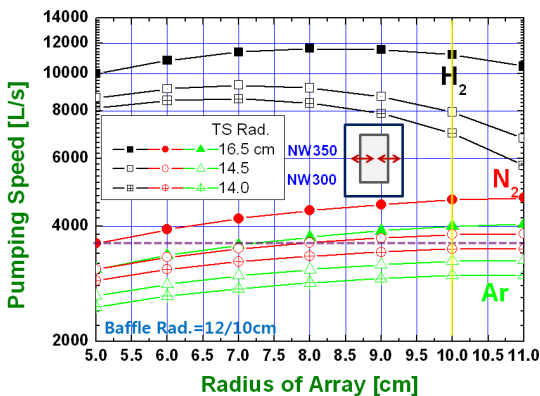


Figure 2. Pumping speed of H₂, N₂, and Ar as a function of charcoal array radial size for three sets of intake port-thermal shield-baffle: 35-33-24, 30-29-20, 30-28-20. Broken line is the target value.

산 범위 내에서는 배기속도 증가가 둔화되는 정도에 머문다. 활성화탄 어레이의 크기는 수소 배기속도 감소율을 고려하면 열차폐 직경이 330 mm일 때는 직경 200 mm가 적절하다고 판단된다. 이때 수소 배기속도는 11,200 L/s이고 질소 및 알곤 배기속도는 4,690 L/s 및 4,000 L/s가 예상된다. 만일 흡기구 플랜지 및 열차폐 내경을 300 mm와 290 mm로 한다면 수소, 질소, 알곤에 대해 각각 7,900 L/s, 3,800 L/s, 3,200 L/s의 배기속도가 되므로 여전히 목표치 달성은 가능하지만 여유가 거의 없고 수소 배기속도의 큰 하락을 피할 수 없다.

Fig. 3은 활성화탄 어레이의 길이가 배기속도에 미치는 영향을 보여주고 있는데 길이가 늘어날수록 배기속도가 당연히 증가하지만 늘어나는 정도는 점점 둔화된다. 길이에 단순 비례하여 배기속도가 늘어나지 않는 현상은 수소가 더 심한데, 이는 흡기구에서 먼 쪽에서 늘어난 활성화탄 어레이 부분까지 입자가 도달하는 것이 힘들어서 배기속도 증가에 대한 기여도가 줄어들기 때문이다. 어레이의 길이는 열차폐의 내부 길이가 300 mm인 점을 고려해서 기준 값인 200 mm 그대로 정했다.

Fig. 4는 배플의 크기 또는 배플과 열차폐와의 간격을 변화시켰을 때 배기속도의 변화를 그린 것이다. 예상할 수 있는 대로 배플을 작게 할수록 배기속도는 점차 늘어난다. 배플이 성글어도 빈 공간 보다는 통과확률이 낮기 때문인데 앞서 논의한 대로 배플을 작게 하면 입자를 잘 통과시킨다는 측면에서 유리하지만 복사열 투과가 같이 증가하므로 제한이 필요하다. 일단 어레이의 크기보다는 커야하므로

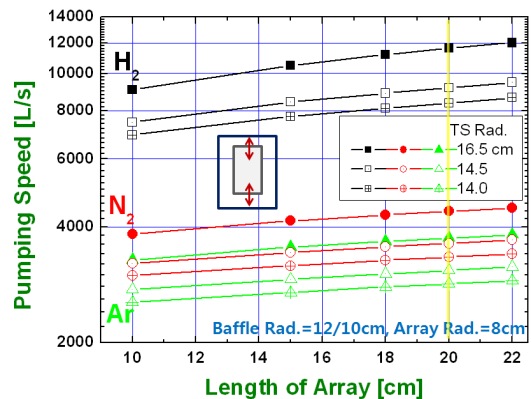


Figure 3. Pumping speed of H₂, N₂, and Ar depending on the array length for three aperture sizes of thermal shield. The array length is varied equally on either side.

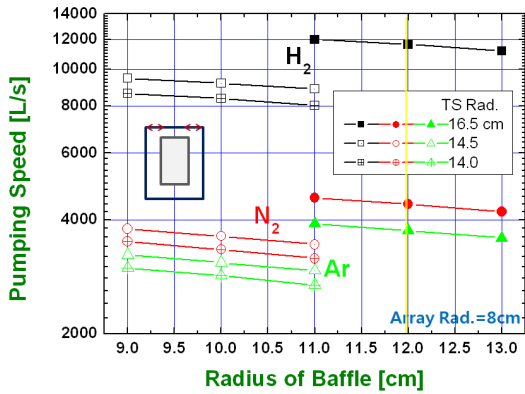


Figure 4. Pumping speed of H₂, N₂, and Ar as a function of the baffle radius for three aperture sizes of thermal shield.

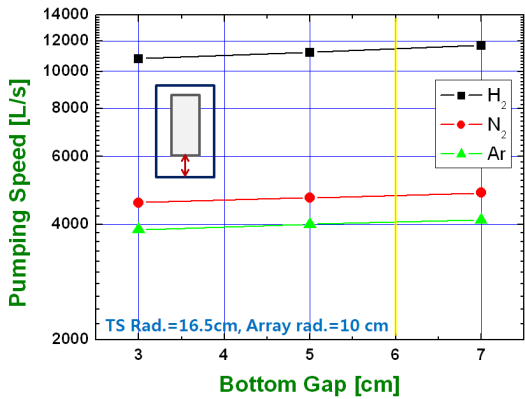


Figure 5. Influence of the gap between array bottom and thermal shield on the pumping speed of H₂, N₂, and Ar.

직경을 240 mm로 정했다.

Fig. 5는 활성화된 어레이의 상하 위치를 변화시켰을 때 배기속도에 미치는 영향을 그린 것이다. 전체적인 크기가 고정되어 있는 데도 불구하고 어레이가 배플쪽에 가까워질수록 배기속도가 소폭이지만 증가하는 것을 알 수 있다. 역시 킨덕턴스가 커지기 때문에 나타나는 현상으로 수소는 더 큰 영향을 받는다. 열차폐와 어레이 하단부 사이의 간격을 크게 하면 상단부가 배플에 너무 가까워지고 응축성 기체의 배기용량에 악영향을 미칠 수도 있으므로 60 mm로 정했다.

이상의 계산 결과와 논의를 바탕으로 펌프 제원을 정하면 Fig. 6과 같이 된다.

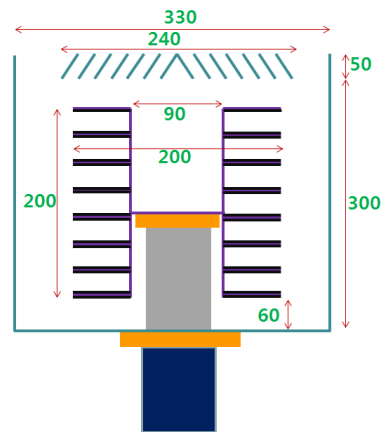


Figure 6. Pump dimensions determined optimally by Monte Carlo simulation.

2. 배기용량, 최대유량, 교차(crossover) 값 추산

크라이오펌프의 배기성능을 대변하는 성능지표로는 배기속도 외에 배기용량, 최대유량 및 교차값이 있다. 이 세 가지 성능지표들이 물리적으로 어떻게 펌프 제원과 연관되어 있는지 알아보는 방편으로 신뢰성은 높지 않지만 해석적인 방법으로 각 값들을 추산해 보려고 한다.

배기용량은 배기속도가 50%로 떨어질 때까지 배기한 양으로 정의되지만 광의로 해석하면 응축 또는 흡착된 기체 분자들의 증기압이 특정 압력 이상이 되거나 더 이상 얼음이 자랄 수 없는 상태에 이르렀을 때까지 배기된 양이라고 할 수 있다. 응축성 기체라면 다음과 같이 배기용량 Q를 추산할 수 있다.

$$Q = A_{array} t_{lim} Q_{unit}$$

이때 A_{array} 는 활성화된 어레이 디스크들의 기하학적 표면적, t_{lim} 은 얼음의 최대 두께, Q_{unit} 는 단위 면적, 단위 얼음 두께 당 응축량이다. 단위 응축량은 얼음의 밀도에서 구해지는데 질소와 알곤의 얼음 밀도는 각각 1.03 및 1.75 g/cm³ 이므로 단위 응축량은 각각 90 및 105 mbar·L/cm²·mm 정도 된다. t_{lim} 은 얼음이 주변 구조물에 닿거나 얼음 표면 온도가 올라가 증발이 일어나는 것 때문에 제한된다. 얼음의 열전도도는 1 W/m·K로 매우 낮지만 열유속도 0.01 W/cm² 이하로 아주 적어서 온도상승은 1 K/cm를 넘기 힘들다. 따라서 최대 얼음 두께는 주로 펌프 내부 구조에 의존한다고 볼 수 있다. 시제품에서는 어레이 디스크간 거리

가 2.8 cm에 불과하므로 얼음의 두께가 1 cm를 넘어서면 내부 공간으로 접근성이 떨어져서 배기속도가 현저히 줄어들 것으로 예상된다.

수소와 같은 흡착성 기체는 극히 소량만 금속면에 붙을 수 있고 대부분은 활성탄에 부착된다. 활성탄은 무수한 세공으로 구성되어 있어서 비표면적이 1,000 m²/g에 달한다. 활성탄 세공 내부 표면에 단원자층을 형성한다고 가정하면 흡착량은 다음처럼 구해진다.

$$Q = A_{\text{charcoal}} M Q_{\text{mono}}$$

이때 A_{charcoal} 은 활성탄 도포 면적, M 은 활성탄 도포 밀도로 약 500 g/m², Q_{mono} 는 단위 활성탄 무게 당 단원자층 흡착량으로 약 400 mbar·L/g이다.

시제품 활성탄 어레이의 총 표면적은 4,470 cm²이고 활성탄 도포 면적은 3,720 cm²이다. 따라서 질소의 배기용량은 4,470×90×10⁻⁶~4×10⁶ mbar·L로 예상된다. 마찬가지로 알곤은 4.7×10⁶ mbar·L로 추산된다. 이 값들은 100 기압, 40 L 들이 개스용기에 들어 있는 기체 양에 해당하는 것으로 다른 응축성 기체들도 크게 다르지 않을 것으로 생각된다. 반면에 흡착성인 수소의 배기용량은 3,720×0.05×400~7.4×10⁴ mbar·L로 추정 가능하다. 이는 응축성 기체의 ~1/60에 불과하지만 여전히 큰 값이다.

최대유량과 교차값은 2차 냉각단 온도가 20 K 이하에서 유지될 수 있는 기체 유입량의 상한 값으로 전자는 지속적인 기체 유입에 대해, 후자는 순간적인 기체 유입에 대한 조건이다. 다량의 기체가 유입될 때 2차 냉각단의 온도 상승은 응축열 또는 흡착열, 기체 분자의 엔탈피 변화 및 기체 열전도가 영향을 미친다. 2차 냉각단의 냉각능력 Q_{cooler} 와 열손실이 평형을 이루는 선에서 최대 유량 q_{max} 가 결정된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_{\text{cooler}}[20K] = q_{\text{max}}(Q_{\text{stick}} + \Delta H(80K \rightarrow 20K)) + Q_{\text{cond}}$$

이때 Q_{stick} 는 질소와 알곤의 경우는 단위 유량 당 응축열로서 0.25 및 0.29 [W/(mbar·L/s) 또는 J/mbar·L]로 주어지고 수소의 경우는 흡착열로서 응축열과는 달리 표면 상태에 따라 0.3~1 W/(mbar·L/s)의 값을 가진다 [4-6]. ΔH 는 엔탈피 변화라서 수소와 질소는 0.075, 알곤은 0.055 J/mbar·L로 주어진다. 기체 열전도는 펌프 내부 압력에 비

례하므로 $Q_{\text{cond}} = Q_0 q_{\text{max}} / S$ 로 표현할 수 있고(S 는 배기속도, Q_0 는 단위 압력 당 열유속), 질소와 알곤은 시제품 기준 Q_0/S 가 ~0.1 W/(mbar·L/s)이며 수소는 0.15 W/(mbar·L/s) 정도 된다. 최대유량은 최종적으로 다음 식으로 계산된다.

$$q_{\text{max}} = Q_{\text{cooler}} / (Q_{\text{stick}} + \Delta H + Q_0/S)$$

시제품의 2차 냉각단 냉각능력을 10 W라고 하면 앞에서 결정한 값들을 사용하여 질소는 $q_{\text{max}} = 10/0.42 \sim 23.8$ mbar·L/s ~ 1,425 sccm, 알곤은 ~1,370 sccm, 수소는 500~1,170 sccm으로 추산할 수 있다.

교차값은 펄스 기체를 배기할 때 2차 냉각단 온도가 20 K가 되는 기체량으로 주어지는데 열부하나 열전도가 모두 과도 상태라서 추산이 쉽지 않지만 일정 시간 동안 기체가 주입되어 활성탄 어레이의 온도를 상승시키는 데 필요한 열용량과 냉각량을 고려하여 다음 식을 만들 수 있다.

$$(PV)_{\text{cross}}[\text{mbar} \cdot \text{L}] = [(M_{\text{copper}} n_{\text{copper}} + M_{\text{charcoal}} n_{\text{charcoal}}) \Delta T + Q_{\text{cooler}} \tau] / (Q_{\text{stick}} + \Delta H(80K \rightarrow 20K))$$

이때 M 은 질량, n 는 비열, ΔT 는 2차 냉각단 온도상승 값으로 10도가 일반적이다. τ 는 기체가 주입되어 배기가 끝날 때까지 걸리는 시간으로 기체 주입시간을 3초 이내로 제한하고 있지만 펄스 기체에 대한 펌프의 배기에는 30초 이상 소요된다. 시제품에서 구리의 질량은 2 kg이고 기타 활성탄과 접착제는 280 g 및 200 g 정도다. 구리의 비열은 10~20 K 사이에서도 크게 변하지만 0.007 J/g·K로 잡고, 활성탄과 접착제의 비열은 0.01 및 0.2 J/g·K로 잡으면 질소의 경우 $PV = 508/0.28 \sim 1,810$ mbar·L 정도로 추산이 가능하다.

III. 성능평가 시험

크라이오펌프 국산 시제품 성능시험을 위해서 펌프 제작처인 우성진공에 평가장치를 만들고 현장에서 직접 시험평가를 진행했다. Fig. 7은 16.5인치 펌프 시험용 표준용기와 장착되어 있는 시제품 사진이다. 맥동관 냉동기는 아래를 향해 거꾸로 놓았을 때 최고의 성능을 나타내기 때문에 표준용기를 뒤집어서 설치하고 펌프를 올려놓았다. 압력 측



Figure 7. Double dome standard test chamber and prototype cryopump (WS-PT350) installed on it.

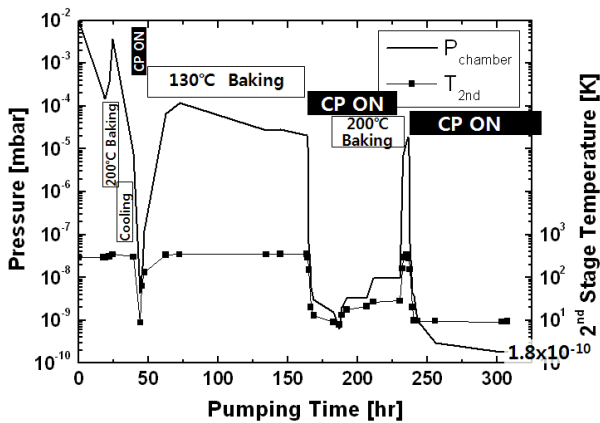


Figure 8. Initial pumping history curve of prototype cryopump. The ultimate pressure of 1.8×10^{-10} mbar is attained in this period.

정에 사용한 인출형 전리진공계는 아직 따로 교정하지는 않았고 오리피스 상하 게이지를 상대적으로 감도 보정하여 배기속도 계산에 적용했다. 추후 게이지들을 절대 교정하여 모든 실험 데이터를 보정할 예정이다.

크라이오펌프 시제품을 장착하고 처음 배기를 시작하면 활성탄에 들어있는 다량의 공기와 수분이 오랫동안 방출되므로 저진공 펌프로 10시간 정도 뽑아낸 후 고진공 펌프 작동이 가능해진다. Fig. 8은 배기를 시작한 후 1.8×10^{-10} mbar에 도달할 때까지 용기 가열, 펌프 재생 등 배기이력을 간략화해서 정리한 것이다. 크라이오펌프가 달려있는 용기는 활성탄에서 나오는 다량의 수분이 흡착되므로 좋은

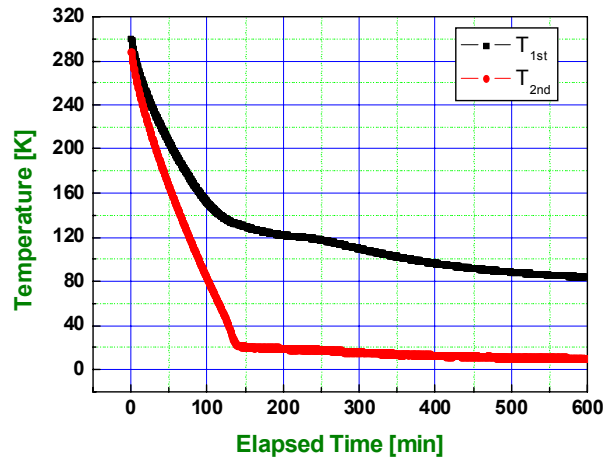


Figure 9. Cool-down curve of prototype cryopump.

진공을 얻기 위해 고온 가열이 필수적이지만 크라이오펌프 온도가 같이 올라가는 것이 문제다. 따라서 200도 가열을 하는 동안은 크라이오펌프를 가동하면서 온도상승을 억제하고 오염된 활성탄 어레이는 가열과정 말미에(그림에서 사각 테 부분) 재생과정을 거치는 약간의 복잡한 과정을 거쳤다.

Fig. 9는 시제품의 냉각곡선이다. 2차 냉각단 온도가 20 K까지 내려가는 데 걸리는 냉각시간은 135분이다. 1차 냉각단 및 2차 냉각단의 도달 온도는 각각 82 K 및 9 K이다. 2차 냉각단 온도는 충분히 낮은 수준까지 내려가는 데 반해 냉각시간은 15분 정도 단축해야 한다. 냉각시간이 많이 걸리는 것은 1차 냉각단 온도가 100 K에 빠르게 접근하지 않는 것과 관련이 있다. 다른 상용품과 비교해 보면 2차 냉각단 온도가 150 K에 도달하는 시간은 같지만, 이때 1차 냉각단 온도가 예를 들어 60 K에 비해 190 K로 크게 높아져 이후 2차 냉각단 온도가 순조롭게 떨어지는 것을 방해하는 요소로 작용한다. 이것은 현재의 열차폐를 더 가볍게 만들어서 해결될 수 있을 것으로 생각한다. 크라이오펌프의 배기성능은 사실상 2차 냉각단 온도에 의존하므로 1차 냉각단 온도는 2차 냉각단 온도를 20 K 이하로 유지해 주는 환경만 조성해 줄 수 있으면 되지만 대유량에 대한 성능을 확보한다는 측면에서 보면 도달온도가 65 K까지 낮아지면 이상적이므로 열차폐 외벽 표면처리에 더 신경을 써서 복사열 부하를 줄이고, 배플을 통과하는 복사열을 낮추는 방안을 강구하며 궁극적으로는 냉동기 1차 측 냉각능력을 약간 증강시킬 필요가 있다.

Fig. 10은 압력에 따른 질소, 수소, 알곤의 배기속도를 정리한 것이다. 평가장치가 이중 돔형이므로 MFC법과 오

리프스법이 모두 사용가능한데 전자는 진공계를 개별적으로 감도 보정해야 하고 후자는 상대적으로 보정해도 배기속도를 구할 수 있다. 현재 게이지 교정 계획이 지연되어 개별적인 교정을 하지 못한 상태에서 실험이 시작되었기 때문에 우선 게이지들 끼리 상대적 교정을 하고 오리피스 법으로 배기속도를 구했다. 흡착성인 수소는 압력이 높을 때 흡착자리를 점유하려는 경향이 심해져 배기속도가 떨어진다. 반면에 응축성인 질소와 알곤은 압력이 높아져도 기본적으로 어디에나 응축이 가능하므로 배기가 더더지지 않

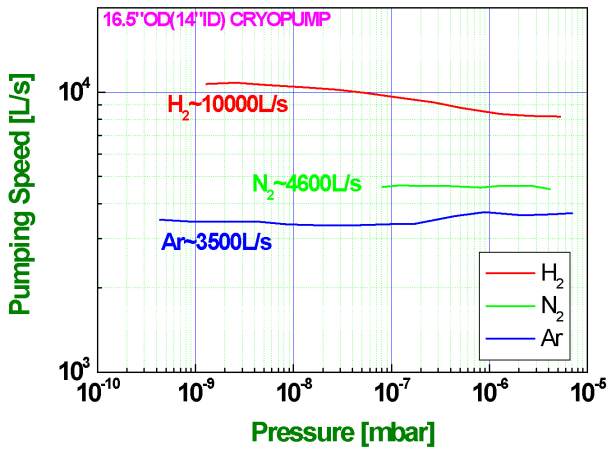


Figure 10. Pumping speed curves for hydrogen, nitrogen and argon depending on the working pressure.

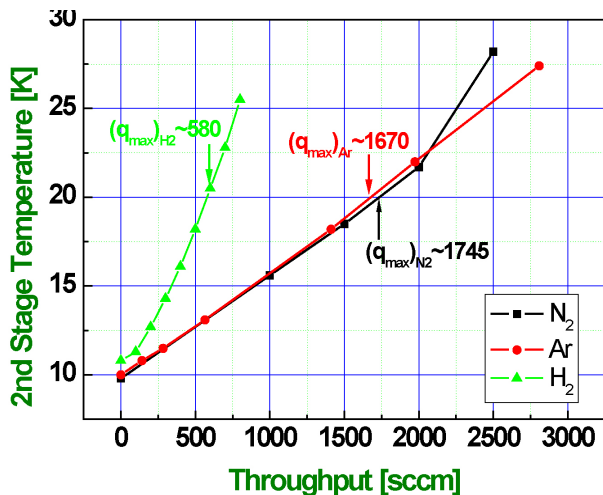


Figure 11. Maximum throughput is defined as the flow rate when 2nd stage temperature increases up to 20 K. Measured values are 1,745, 1,670, 580 sccm for nitrogen, argon, and hydrogen, respectively.

고, 오히려 증기압 대비 압력이 커지면서 실효 배기속도가 커지고, 또 얼음이 두꺼워지면서 실 표면적이 늘어나 오히려 배기속도가 증가하는 경향을 보인다. 평균적으로 수소는 10,000 L/s, 질소는 4,600 L/s, 알곤은 3,500 L/s의 배기속도를 나타내는데 실험오차 및 시뮬레이션에서 부차 계수 값이 가지는 불확실성을 고려하면 다양한 기체에 대해 계산과 전반적으로 잘 일치하는 것으로 보인다.

Fig. 11은 질소, 알곤 및 수소에 대한 최대유량을 측정된 결과를 그린 것이다. 최대유량은 크라이오펌프로 유입되는 기체 유량이 늘어나면서 흡착열 또는 응축열에 의해 2차 냉각단 온도가 증가하여 20 K에 도달했을 때 유량이다. 이때 온도 상승에 추가적으로 영향을 미치는 요인은 높은 실험압력에서 기체 열전도가 있을 수 있다. 그림에서 질소, 알곤, 수소의 최대유량은 각각 1,745 (~29), 1,670 (~28), 580 (~9.7) sccm (mbar·L/s)으로 구해진다. 통상 흡착열이 크고, 열전도도가 높은 수소의 최대유량은 응축성 기체에 비해 1/3 수준으로 알려져 있다 [7]. 이때 1차 냉각단 온도도 약간 상승하는데(2차 냉각단 온도 상승의 1/5) 이는 응축열 때문이 아니라 300 K와 80 K에 해당하는 기체 분자의 엔탈피(enthalpy) 변화와 함께 1차 냉각단과 2차 냉각단이 열적으로 연결되어 있기 때문이다.

Fig. 12는 크라이오펌프의 교차값을 측정한 것이다. 교

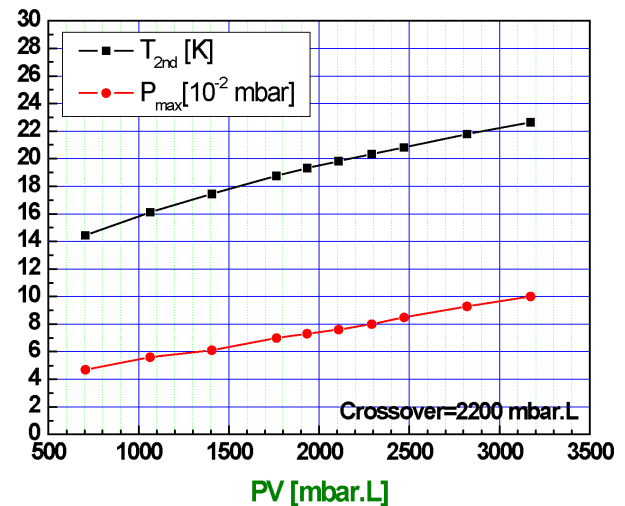


Figure 12. 2nd stage temperature and chamber pressure as a function of gas pulse. Crossover is defined as maximum pumped amount of gas pulse when 2nd stage temperature is maintained below 20 K. Measured crossover value is 2,200 mbar·L for nitrogen.

차값은 저진공 펌프로 초벌배기하고 있는 용기의 압력이 얼마나 높을 때부터 크라이오펌프로 전환이 가능한가를 가늠하는 잣대다. 부피를 아는(이 실험에서는 V=3.52 L) 보 조용기에 일정 압력으로 질소를 채운 후 표준용기로 일시에 투입하여 2차 냉각단 온도가 20 K에 도달하는가를 측정하는 것으로, 온도 상승은 대부분 응축열 때문인데 최대값까지 올라가는 데 30초 정도 소요되고 다시 원래 값으로 되돌아 오는 데는 5분 이상 필요하다. 참고로 압력은 5×10^{-2} mbar 내외의 최대 값까지 상승하는 데 3초가 소요되고 5×10^{-8} mbar까지 떨어지는 데는 약 90초가 걸리며 배기 속도를 곱해서 적분한 값은 펄스 기체 투입량과 같다. 실험 결과 교차값은 2,200 mbar·L로 구해졌다. 따라서 예를 들어 이 펌프를 1,000 L 용기에 달아서 사용한다면 용기 압력이 2.2 mbar일 때 크라이오펌프 흡기구 밸브를 안전하게 열 수 있다. 한 가지 유의할 점은 배기용량과 비교할 때 교차값은 약 1/2,000 수준이라는 점이다. 이것은 용기를 대기개방 및 초벌배기하고 고진공 배기하는 과정을 2,000번 반복하는 동안 크라이오펌프가 재생 없이 제 기능을 유지할 수 있음을 뜻한다.

Fig. 13은 크라이오펌프의 질소 배기용량을 측정한 것이다. 배기용량은 배기속도가 50%까지 떨어질 때까지 배기 한 기체 총량을 가리키는데 어떤 압력대에서 실험하는가에 따라 달라질 수 있다. 배기속도 측정 기준압력인

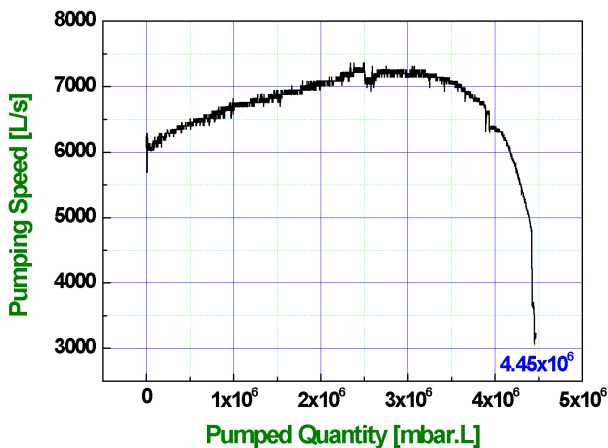


Figure 13. Pumping capacity is given by total gas amount pumped till the pumping speed goes down to 50% of initial value. 4.45×10^6 mbar·L is obtained for nitrogen. Chamber pressure measured with CDG during experiment is in 10^{-3} mbar range.

5×10^{-6} mbar를 유지하는 것이 좋는데 수소 같은 흡착성 기체는 가능하지만 질소나 알곤 같은 응축성 기체들의 배기용량은 엄청나게 크기 때문에 기준 압력에서 실험한다면 5~6년은 걸릴 것으로 예상되므로 사실상 실현불가능하다. 따라서 실험은 500 sccm을 일정하게 흘리면서 10^{-3} mbar 대 압력에서 이루어졌으며 1주일이 걸렸다. 배기속도는 얼음이 얼면서 유효면적이 늘어나 실험 시작 후 지속적으로 증가하다가 얼음이 두꺼워져서 표면온도가 상승하면서 배기속도가 감소하는데 이때는 변화가 급격하기 때문에 배기속도의 몇 십%라고 하는 것과 큰 상관없이 거의 비슷한 값으로 정해진다. 그림에서 질소의 배기용량은 4.45×10^6 mbar·L로 구해지는데 응축성 기체라는 특성상 알곤도 유사한 값을 나타낼 것으로 판단된다. 수소의 배기용량 측정은 회사 실험실의 안전시설이 미비하여 시행하지 않았다.

IV. 결 론

맥동관 냉동기를 채택하여 개발한 국산 크라이오펌프 시제품의 배기성능을 종합적으로 평가했다. 배기속도, 배기용량, 최대유량, 교차값 등 규격에서 요구하는 기본 성능지

Table 2. Specifications of prototype cryopump.

		설계/추산값	측정값
Pumping port		CF, O,D420, I,D350	
Pumping speed (L/s)	H ₂	11,200	10,000
	Ar	4,000	3,500
	N ₂	4,680	4,600
Pumping capacity (mbar·L)	N ₂	4,000,000	4,450,000
	Ar	4,700,000	-
	H ₂	74,000	-
Ultimate pressure (mbar)		10 ⁻¹⁰ range	1.6×10 ⁻¹⁰
Max. throughput (sccm)	N ₂	1,425	1,745
	Ar	1,370	1,670
	H ₂	500~1,170	580
Cooldown time (min)		120	135
Regen. time (min)		120 (Full) 60 (Quick)	- 75 (Quick)
Crossover (mbar·L)		1,810	2,170 (N ₂)
Ar recovery time (sec) 1,000 sccm·h		<300	132

표들을 몬테카를로 계산 및 해석적으로 추산하고 실험적으로 값들을 구했다. 이 외에도 회사에서 크라이오펌프의 공정 대응성 확인용으로 많이 시행하는 알곤 회복시간도 측정했다.

시제품의 배기속도는 질소, 알곤, 수소에 대해 각각 4,600, 3,500, 10,000 L/s로 측정되었으며 계산값과 전반적으로 일치한다. 배기용량, 최대유량, 교차값의 측정결과 시제품의 제원에 걸맞는 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 알곤 회복시간도 5×10^{-8} mbar까지 회복하는 데 2분 남짓 걸리므로 기준을 충분히 통과했다(이에 대해서는 다른 논문에서 상세히 다룰 예정이다). 단지 펌프 냉각시간이 다소 늦는 것을 보완하기 위해 열차폐를 가볍게 하고 배플의 복사열 투과를 줄이는 방향으로 개선할 예정이다. 시제품 성능지표들의 예상치와 실측치를 정리하면 Table 2와 같다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부 전략기술개발 사업 중 표준과학연구원에서 주관하는 “고진공펌프 종합특성평가시스템 설계,

진단 기술 개발”과제의 지원에 의해 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

- [1] K. M. Welch, B. Andeen, J. E. de Rijke, C. A. Foster, M. H. Hablanian, R. C. Longworth, W. E. Millikin, Y. T. Sasaki, and C. Tzemos, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **17**, 3081 (1999).
- [2] Vacuum pumps acceptance specifications part 5- Refrigerator cooled cryopumps, PNEUROP PN5A SRCC/5 (1989).
- [3] R. C. Longworth and R. J. Webber, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **9**, 2766 (1991).
- [4] C. Hayashi, *Vacuum Technology* (in Japanese) (Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 1985), p25.
- [5] S. R. In and M. Y. Park, *J. Korean Vac. Soc.* **12**, 86 (2003).
- [6] L. J. Peng and J. R. Morris, *Carbon* **50**, 1394 (2012).
- [7] R. A. Haefer, *Cryopumping* (Oxford, New York, 1989), p. 144.

Performance Estimation and Test of Prototype Pulse Tube Cryopump

Sang Ryul In^{a*} and Sang Paek Kang^b

^a*Fusion Engineering Development Division, KAERI, Daejeon 305-353,*

^b*Woosung Vacuum Ltd., Chungwon 363-813*

(Received December 20, 2012, Revised February 9, 2013, Accepted February 19, 2013)

The cryopump of the pulse tube type has been developed successfully, and manufacturing of a prototype pump is finished under leading of Woosung Vacuum. The target pumping speed of the prototype pump is above 3,600 L/s for nitrogen with the intake port of 14 inches I.D (16 inches O.D). For designing optimally the pump structure including the charcoal array, thermal shield, and baffle, the pumping speed was simulated for various configurations through Monte Carlo method. Pumping performances of the prototype cryopump manufactured on the basis of optimal design were conformed experimentally with a standard test system and procedures. The measured N₂ pumping speed of the prototype cryopump was 4,600 L/s which agreed well with simulated one and exceeded the target value.

Keywords : Pulse tube, Cryopump, Ptototype, Performance estimation, Test

* [E-mail] srin@kaeri.re.kr