

크라이오펌프 알곤 회복시간 측정과 알곤 불안정성 분석

인상렬^{a*} · 이동주^b

^a한국원자력연구원 핵융합공학기술개발센터, 대전 305-353

^bGVT(주), 평택 459-050

(2013년 5월 11일 받음, 2013년 6월 16일 수정, 2013년 7월 17일 확정)

크라이오펌프는 응축과 흡착을 통해 기체를 배기하므로 극저온 표면 온도와 증기압이 배기성능에 큰 영향을 미친다. 어느 부분의 온도가 어중간하면 한번 응축했던 기체분자가 방출과 재응축 또는 재흡착을 반복하여 진공용기 압력이 어느 선 이하로 떨어지지 않고 심한 요동을 나타낸다. 어떤 기체나 특정 온도 범위에서 이런 불안정성이 나타날 수 있지만 크라이오펌프를 많이 사용하는 스퍼터 장치의 공정기체인 알곤을 배기할 때 불안정성이 발생하는 것은 좋지 않다. 본 논문에서는 알곤 회복시간 측정실험을 수행하면서 크라이오펌프의 알곤 불안정성의 원인과 대책을 분석했다.

주제어 : 크라이오펌프, 응축, 알곤 불안정성, 표면온도, 증기압

I. 서 론

크라이오펌프는 흡기구 면적당 가장 큰 배기속도를 나타내는 진공펌프다. 이런 큰 배기속도와 함께 기계적 회전체가 없이 단지 극저온 표면을 형성해 두는 것만으로 배기성능을 유지하는 크라이오펌프의 특성 상 매우 큰 기체 유량에 대해서 기능저하 없이 잘 견딘다는 것이 최대 강점이다. 그리고 다른 흡장형 펌프들과 달리 화학적 배기작용을 하지 않으므로 헬륨을 제외하고는 불활성 기체를 배기하는데도 전혀 어려움이 없다 [1]. 따라서 다량의 알곤을 공정기체로 사용하는 스퍼터 장치에서는 주펌프로 크라이오펌프가 많이 사용된다.

크라이오펌프는 활성화탄에 흡착되는 수소를 제외하면 대부분의 기체들을 극저온 표면에 응축시킴으로써 배기한다. 기체분자들이 외부로 배출되지 않고 표면에 붙어있으므로 표면온도와 부착 조건에 따라 일정 수준의 증기압을 나타내는 것을 피할 수 없고 이것이 펌프 및 진공용기의 도달압력을 결정한다. Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 만일 표면온도가 20 K 이하라면 헬륨, 수소, 네온을 제외한 모든 기체는 10^{-10} mbar 이하의 증기압을 나타낸다. 만일 표면온도가 30 K를 나타내면 알곤 증기압은 2×10^{-7} mbar 정도

로 커지고 50 K가 넘어서면 실용적인 측면에서 알곤의 응축은 불가능하다.

크라이오펌프의 구조를 살펴보면(Fig. 2) 냉동기에는 온도가 각각 35~65 K 및 10~15 K로 유지되는 1차 및 2차 두개의 냉각단이 마련되어 있는데 1차 냉각단에는 열차폐와 배플이 달리고 2차 냉각단에는 활성화탄 어레이가 달린다. 온도가 높은 배플이나 열차폐에 달라붙는 물 분자를 제외한 나머지 기체들은 기본적으로 활성화탄 어레이에서 배기된다. Fig. 3에서 보면 알곤은 2차 냉각단 온도가 100 K 근처가 되면 벌써 배기되기 시작하는데 이는 활성화탄 면에서만 가능하고 금속 면에서는 앞서 언급한 대로 50 K 이하가 되어야 가능하다. 2차 냉각단 온도는 정상상태에서 10 K 내외에서 유지되므로 활성화탄 어레이의 활성화탄이건 금속 면이건 상관 없이 한 번 부착된 알곤이 저절로 방출되지는 않는다.

1차 냉각단에 붙어있는 원통형 열차폐는 300 K 복사열에서 2차 냉각단과 활성화탄 어레이를 보호하는 기능을 하고 배플은 일부 열차폐 기능을 유지하면서 기체분자가 펌프 내부로 들어가는 통로로서 작용한다. 열차폐와 배플은 일반 기체에 대한 배기기능을 염두에 두고 고안된 것은 아니다. 그러나 만일 1차 냉각단 온도가 30~50 K 사이에 있으면 알곤이 다소간 부착가능하고 이렇게 비교적 고온부위에

* [전자우편] srin@kaeri.re.kr

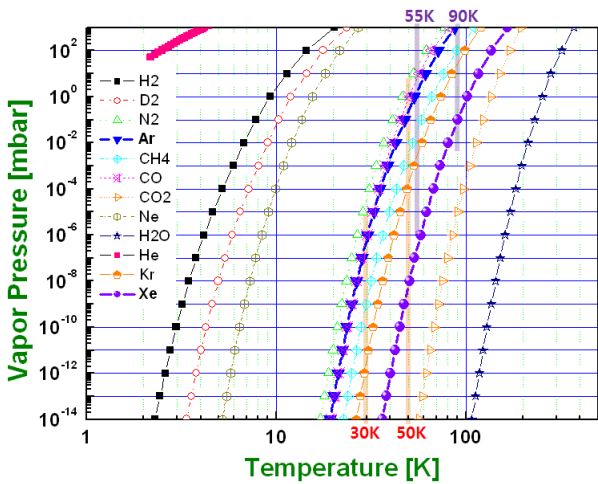


Figure 1. Vapor pressure of some gases. For argon the temperature range of 30~50 K may induce the pressure hang-up and instability due to repetitive loose adhesion and desorption. That is also true for Xe in the 55~90 K range.

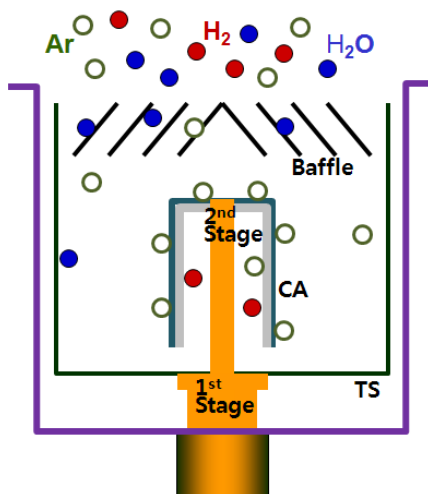


Figure 2. Structure of cryopump. Thermal shield (TS) and baffle are put on the 1st stage of the cold-head, and charcoal array (CA) on the 2nd stage. If the temperature of the baffle or thermal shield is too lower than normal, Ar can be adhered on it undesirably.

부착된 알곤이 영구적으로 고착되는 것은 불가능하므로 주위 압력에 따라 다시 방출되었다가 일부는 활성탄 어레이 쪽으로 이동하지만 일부는 다시 열차폐 쪽에 부착되는 순환작용이 계속될 것으로 예상할 수 있다. 따라서 알곤 주입을 멈춰도 한 번 들어 온 알곤이 완전히 배기되지 못하고 용기 압력은 일정 수준 아래로 잘 내려가지 않으며 때에 따

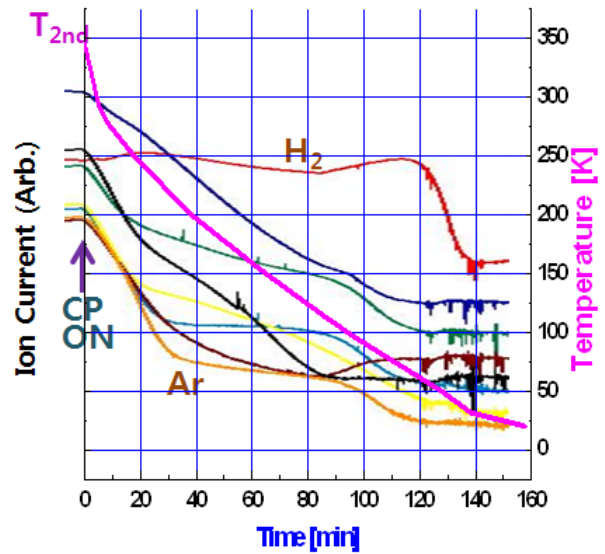


Figure 3. Typical gas spectra and 2nd stage temperature change during cool-down of the cryopump. The y axis scale is logarithm for the ion current (arbitrary), and linear for the temperature. Each gas has due timing to be pumped. The initial drop appearing in the every gas spectrum except hydrogen is due to the reduction of outgassing from pump itself.

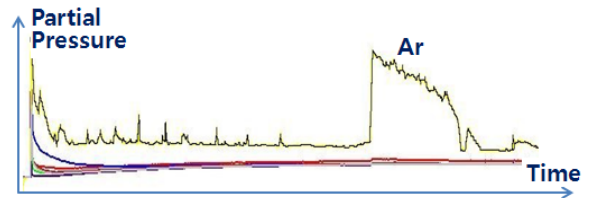


Figure 4. Erratic fluctuation of Ar partial pressure ($10^{-8} \sim 10^{-5}$ mbar in logarithmic scale) after 2,000 sccm · h introduction. A giant burst of even three order high is shown.

라 알곤의 방출이 폭발적으로 일어나기도 하므로 Fig. 4와 같이 압력이 급격히 증가했다 빠르게 감소하는 것이 반복되면서 불안정성이 나타나게 된다고 해석된다.

1차 냉각단 온도가 위와 같은 범위에 있지 않은 경우라도 냉동기 또는 펌프 구조물 전체로 볼 때 10 K에서 상온까지 온도가 연속적으로 분포하고 있으므로 어느 곳에선가는 정도의 차이는 있지만 압력 불안정성을 일으키는 요인이 존재하기 마련이다. 이런 거시적인 압력 불안정 상태는 크라이오펌프 사용 현장에서 알곤 장애(hang-up)라는 현상으로 널리 알려져 있고 이런 문제점을 해소하기 위한 방안들

이 제안된 경우도 있다 [2-5]. 하지만 막상 어떤 조건에서 발생하는지 체계적인 조사를 시행한 문건을 찾기 어렵다.

본 논문에서는 아직 표준 규격에 들어있지는 않지만 크라이오펌프 제조회사에서 크라이오펌프의 알곤 공정 적합성을 시험하는 가장 중요한 과정으로 시행되고 있는 크라이오펌프의 알곤 회복시간 측정을 하면서 크라이오펌프에서 나타나는 알곤 불안정성의 원인과 대책을 알아보려고 한다.

II. 알곤 회복시간 측정과 알곤 불안정성

크라이오펌프 알곤 회복시간은 크라이오펌프가 알곤을 1,000 sccm·h 배기한 후 통상적으로 압력이 5×10^{-8} mbar까지 몇 분 안에 회복되는가를 나타낸다. 다른 압력 목표치를 설정할 수도 있는데 예를 들어 1×10^{-7} mbar를 기준으로 하는 회복시간을 정의할 수 있다. 이때 필요한 알곤 주입 시간은 유량에 반비례하는데 시험유량은 크라이오펌프의 최대 유량을 넘지 않도록 하면 된다. 즉 활성화된 어레이가 달려있는 2차 냉각단 온도가 20 K를 넘지 않으면 된다. 임의의 크라이오펌프가 일반적인 알곤 공정에서 성능을 발휘할 수 있는가를 보는 것이므로 상대적인 기준이 아니라 절대적인 기준을 적용한다. 따라서 크기가 큰 펌프가 당연히 유리하다.

알곤 회복시간 측정에는 국산 크라이오펌프로 GVT(사)에서 신규로 개발한 HPM20Q 모델을 사용했다(Fig. 5). 이 펌프는 흡기구 직경 200 mm, 질소 배기속도가 1,500 L/s

인 중형 펌프로 알곤 최대유량은 1,350 sccm으로 측정되었으므로 회복시간 시험유량은 1,000 sccm으로 정했다. 특별히 이 펌프는 1차 및 2차 냉각단 온도를 원하는 값으로 쉽게 유지할 수 있어서 알곤 불안정성을 유발하는 부분과 원인을 실험적으로 확인하기에 편리하다. 측정절차는 일정 유량으로 알곤을 주입하면서 30분마다 알곤 주입을 멈추고 압력 변화를 기록하고 다시 30분 동안 알곤 주입하는 식으로 2,000 sccm·h까지 진행된다.

알곤 회복시간을 본격적으로 측정하기 전에 예비실험으로서 알곤을 주입한 후 용기압력에 미치는 1차 냉각단 또는 2차 냉각단 온도의 영향을 먼저 조사함으로써 사용펌프의 알곤 적응성과 회복시간 실험조건을 알아보았다. 우선 1차 냉각단 온도를 50 K로 유지하면서 알곤을 500 sccm·h 주입한 후 압력변화를 측정한 결과 5×10^{-7} mbar까지 회복시간은 6분이 소요되었고 3×10^{-7} mbar에 도달하는 데는 1시간이 걸렸는데 이는 이미 펌프가 심각한 알곤 장애 상태에 있음을 나타낸다. 1,000 sccm·h 주입 후에는 5×10^{-7} mbar 회복시간이 6분 18초, 2,000 sccm·h 이후에는 6분 45초가 소요되었다(Fig. 8(a)). 이 측정 후 펌프의 기본 상태인 1차 냉각단 온도 36 K, 2차 냉각단 온도 11 K에서 하루가 지났을 때 압력은 여전히 2.6×10^{-7} mbar에 머무르고 있어서 10^{-8} mbar대로 진입할 가망성이 안 보였다. 이제 1차 냉각단 온도를 45~60 K까지 단계별로 올리면서 압력을 측정하고(1차), 50 K에서 하루 유지한 후 다시 70 K까지 온도를 올리면서 압력을 측정하고(2차), 50 K로 또 하루를 놔두었다가 다시 80 K까지 올라가며 압력을 측정했다

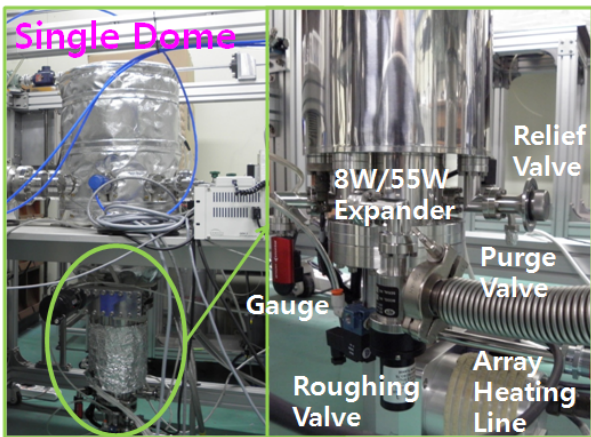


Figure 5. Cryopump test facility (single dome) and HPM20Q model cryopump (GVT) installed on it.

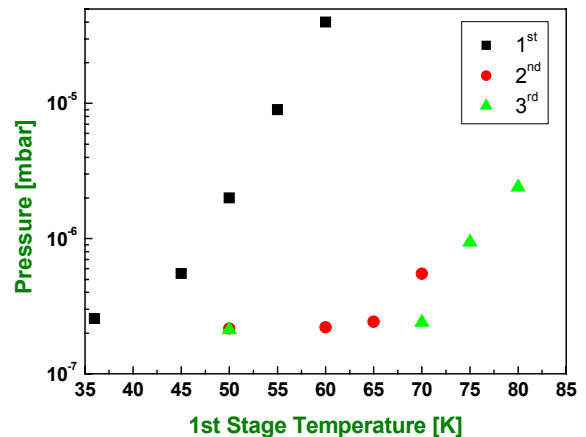


Figure 6. Temperature dependence of the equilibrium pressure in successive three measurements after 2,000 sccm·h introduction of Ar.

(3차). 이때 잔류기체 스펙트럼은 오랜 배기시간에도 불구하고 여전히 알곤이 주를 이룬다.

Fig. 6은 이상 3차시기에 걸쳐 측정된 기저압력의 변화를 보여준다. 이 그림을 통해 알 수 있는 것은 알곤이 1차 냉각단 온도가 올라가면서 방출량이 늘어나 기저압력을 높인다는 것이다. 이것은 알곤 불안정성을 일으키는 원인으로 1차 냉각단에 장착된 부품이 유력하다는 것을 가리킨다. 더군다나 여기서 제시하지는 않았지만 2차 냉각단 온도를 11도에서 15도까지 1도씩 올리면서 압력변화를 측정했을 때 사실상 기저압력 변화가 없는 것으로 보아 1차 냉각단 쪽이 알곤 불안정성의 유일한 원인이라고 단정할 수 있다. 그림에서 또 알 수 있는 것은 시간이 지나면 열차폐나 배플에 부착되었던 알곤이 방출과 재흡착을 거치면서도 서서히 더 찬 곳(활성탄 어레이)으로 이동한다는 사실이다. 즉 시간이 흐르면 언젠가는 결국 알곤 불안정성이 해소된다는 것이다. 그러나 실용적인 측면에서 처음부터 알곤 불안정성이 일어나지 않도록 하려면 어떻게 해야 하는지, 다른 말로 펌프 가동중 1차 냉각단 온도를 몇도로 유지하면 좋은가 하는 질문에 대한 답을 얻을 수 없다. 알곤이 너무 많이 주입되어서 펌프가 사실상 배기불능상태에 빠졌기 때문이다. 따라서 알곤을 소량만 주입한 후 1차 냉각단 온도의 영향을 체계적으로 다시 살펴보기로 했다.

Fig. 7은 알곤 1,000 sccm을 10분간만 주입한 후 1차 냉각단 온도를 40~70 K까지 단계별로 올리면서 알곤 분압 변화를 기록한 것이다. 온도가 차츰 올라가면 역시 알곤 분압이 단계별로 상승하는데 온도가 60 K일 때 알곤 분압이 일단 상승했다가 급격히 감소하기 시작했다. 55 K 아니라 60 K에서 압력 강하가 나타나는 것은 기체 방출의 크기보다는 결국 그 온도에서 재흡착이 얼마나 있느냐에 달려있다고 생각할 수 있다. 온도가 어느 수준 이하이면 비록 방

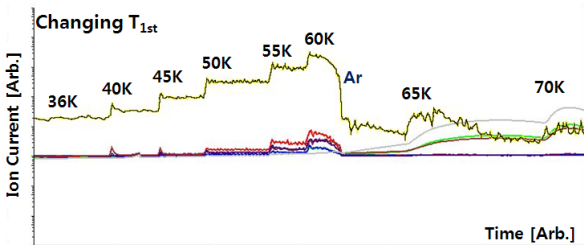


Figure 7. Change of the Ar partial pressure when increasing the temperature of the coldhead 1st stage step by step up to 70 K.

출은 크게 차이가 나지 않아도 재흡착이 계속 일어나 원활한 배기가 어려워진다고 판단된다. 이 측정 결과를 보면 1차 냉각단 온도가 60 K 이상이 되면 알곤을 다량 유입해도 적정 압력범위에서는 알곤 불안정성이 없어질 것으로 예상할 수 있다. 이를 확인하기 위해 최종 알곤 회복시간 측정은 1차 냉각단 온도를 60 K 및 65 K로 놓고 시행했다.

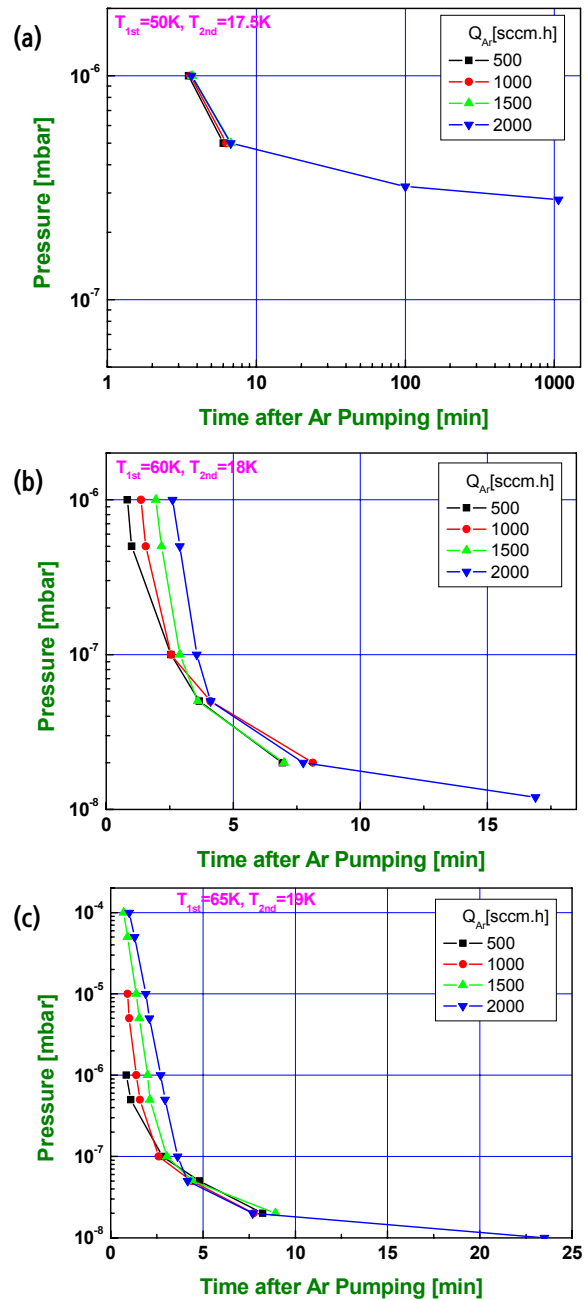


Figure 8. Pressure changes after Ar introduction at the 1st stage temperatures of a) 50 K, b) 60 K, and c) 65 K, respectively.

III. 알곤 회복시간 측정 결과

Fig. 8은 1차 냉각단 온도를 60 K 및 65 K로 유지하면서 알곤을 주입한 후 나타나는 알곤 압력변화를 주입량에 따라 정리한 것이다. 그림에는 비교를 위해 $T_{1st}=50$ K일 때의 예비실험결과도 포함했다. 그림을 통해 5×10^{-8} mbar 회복시간이 5분 이내로 들어와 펌프 배기능력이 정상화되었음을 알 수 있고 1차 냉각단 온도를 60 K로 올리는 것이 알곤 불안정성 해소에 결정적이었다고 판단할 수 있다. 온도를 65 K로 올리는 것은 전반적으로 60 K 때와 별반 다른 점이 없다. 전체적으로(2차 냉각단도 포함해서) 온도가 상승하므로 같은 양의 알곤 주입을 멈춘 후 65 K일 때의 초기 압력이 더 높지만 압력감소 패턴은 유사하다. 60 K나 65 K나 압력이 2×10^{-8} mbar에 이르면 다시 압력 불안정성이 나타나지만 압력은 지속적으로 떨어져서 25분 정도면 1×10^{-8} mbar에 도달한다. 2,000 sccm·h를 주입한 후에도 2시간 정도가 지나면 5×10^{-9} mbar에 도달하고 20시간 정도 지나면 10^{-10} mbar 영역에도 들어간다. 따라서 실용적인 면에서나 펌프 도달압력 측면에서도 1차 냉각단을 60 K 정도로 유지하는 것이 필요충분 조건이라고 말할 수 있다. 1×10^{-6} , 5×10^{-7} , 5×10^{-8} mbar 회복시간을 1차 냉각단 온도의 함수로 그리면 Fig. 9와 같다. $T_{1st}=50$, 60 및 65 K의 경우를 비교해 보면 50 K일 때는 정상적인 알곤 배기가 불가능하고, 60 K와 65 K일 때는 근소하지만 60 K 쪽이 낫다. 가능하면 온도를 낮게 유지한다는 기본 원칙 면에서도 60 K일 때가 상대적으로 좋다고 판단된다.

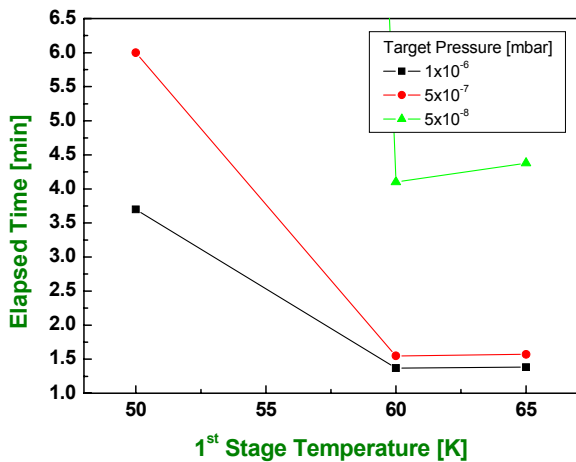


Figure 9. Time required to recover a specified pressure depending on the 1st stage temperature.

IV. 결 론

국산 크라이오펌프 HPM20Q 모델에 대해 크라이오펌프의 알곤 사용 환경 적합성을 잘 나타내는 성능지표인 알곤 회복시간 측정을 수행했다. 이런 대유량 알곤 실험 중 흔히 나타나는 알곤 불안정성의 원인을 조사한 결과 1차 냉각단 온도가 60 K 이상이 되어야 알곤 불안정성이 없어질 수 있다는 결론을 얻었다. 1차 냉각단 온도를 기존 36 K에서 60 K로 승온시킨 후에야 알곤 회복시간 측정이 가능해졌으며 1,000 sccm·h 주입 후 5×10^{-8} mbar 회복시간이 5분 이내로 정상적인 배기능력을 나타냈다. 65 K에서도 유사한 성능을 나타내지만 회복시간이 약간 느리므로 60 K가 알곤 공정에서 최적조건으로 판단된다. 이런 결과에 비추어 보면 만일 이온주입기의 플라즈마 가스처럼 제논을 사용하는 공정이라면 1차 냉각단 온도는 90 K 이상으로 올려야 한다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 전략기술개발 사업 중 한국표준연구원에서 주관하는 “고진공펌프 종합특성평가시스템 설계, 진단 기술 개발”과제의 지원에 의해 이루어졌음.

References

- [1] S. R. In and S. P. Kang, J. Korean Vac. Soc. **22**, 45 (2013).
- [2] D. M. Hoffman, B. Singh, and J. H. Thomas III, *Handbook of Vacuum Science and Technology*, (Academic Press, San Diego, 1998), p. 168.
- [3] K. Welch, *Capture Pumping Technology*, (Elsevier, Amsterdam, 2001), p. 311.
- [4] M. J. Eacobacci and D. A. Olsen, Patent US4546613 (1985).
- [5] H. D. Kishorenath, J. E. de Rijke, and M. O. Foreman, Patent US5386708 (1995).

Measurement of the Ar Recovery Time of a Cryopump and Analysis on the Ar Instability

Sang Ryul In^{a*} and Dong Ju Lee^b

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

^b*GVT, Pyeongtaek 459-050*

(Received May 11, 2013, Revised June 16, 2013, Accepted July 17, 2013)

Cryopump removes gas molecules by condensation and adsorption. Therefore, cryo-surface temperature and corresponding vapor pressure influence directly the pumping performance. If the surface temperature of any part is neither low nor high, there occurs the desorption of gas molecules condensed or adsorbed, and the emitted molecules can be captured again, which leads to a time-consuming and fluctuating change of the pressure. Though every gas can show such a pressure instability at a specified temperature range, the instability generated in a sputter system using Ar as a working gas and operating with a cryopump is especially undesirable. In this paper the cause of the argon instability is analyzed and corrective is provided through the measurement of the Ar recovery time.

Keywords : Cryopump, Condensation, Ar instability, Surface temperature, Vapor pressure

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