

극저온냉동기 직냉형 진공시스템의 냉동부하 평가

홍용주, 박성제, 김효봉, 최영돈
한국기계연구원, 고려대학교

Evaluation of the required cooling capacity of the Cryocooler in the vacuum system

Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Young-Don Choi
Korea Institute of Machinery & Materials, Korea Univ.

yjhong@kimm.re.kr

Abstract - The cryostat or dewar have been widely used for making and maintaining cryogenic and vacuum environments. The thermal performances of such cryogenic vacuum system mainly depend on the radiation heat transfer between hot and cold surface. The characteristics of radiation heat transfer are complicated, because amounts of heat transfer depend on view factor, emissivities, and areas of thermal elements. In this study, the analysis of the radiation heat transfer in the small cryogenic vacuum system was performed using the surface radiation model for evaluation of the required cooling capacity of the cryocooler.

1. 서 론

극저온 진공용기(Cryostat 또는 dewar)의 설계 및 제작시에 용기의 단열성능은 매우 중요한 성능 인자의 하나이다. 낮은 단열성능의 극저온 진공용기는 극저온의 환경을 유지하기 위해 한제(cryogen)를 사용하는 경우 액체질소 또는 액체헬륨의 증발량을 크게 하고, 냉동기를 사용하는 경우에는 큰 냉동능력의 냉동기를 사용하여야 하기 때문에 초기비용 및 운전비용의 증가를 초래할 뿐만 아니라, 설계 운전 온도까지 도달하는데 매우 큰 어려움이 있다.

최근에는 액체질소온도(Normal boiling point, 77K) 및 액체헬륨온도(4.2K) 수준까지 급속하게 냉각할 수 있는 스텔링냉동기(Stirling) 및 Gifford-McMahon 냉동기 등 소형 극저온 냉동기의 성능 및 신뢰성이 급속히 향상됨에 힘입어, 기존 한제에 의해 냉각되어지던 극저온 진공용기에서 한제를 대신하는 극저온냉동기의 사용이 점차 증대되고 있다. 또한 저온센서, 극저온 진공펌프(cryopump) 등에서 극저온 냉동기의 성능유지 및 극저온의 환경을 유지하기 위해서는 진공용기가 필수적이다.

극저온 진공용기에서 단열성능을 결정하는 주

요인자로는 고온면과 저온면 사이에 존재하는 기체에 의한 전도열전달, 고온면으로부터 저온면으로의 복사열전달, 고온면과 저온면을 연결하는 고체를 통한 전도열전달이 있다. 진공용기의 압력이 낮아지면 즉 기체 분자의 평균자유행정이 긴 경우에 전도열전달은 기체분자끼리의 충돌보다는 기체분자와 벽과의 에너지 전달 특성에 의해 좌우되며, 일반적으로 고진공 진공용기의 경우 무시할 수 있는 수준이다.[1] 복사열전달은 진공용기에 있어서 주요한 열침입 경로의 하나로, 복사열유속은 진공용기의 표면의 방사율 및 형태계수(view factor), 고온면과 저온면의 온도에 의해 결정되며, 진공용기내 구조물을 통해 그 열이 전도되어, 한제 또는 냉동기의 사양을 결정하는 주요한 인자로 작용하기 때문에 진공용기 설계에서 뿐만 아니라, 극저온의 환경으로 진공용기를 경제적으로 유지하기 위해서는 복사열유속의 저감이 필수적이다. 그러나 복사열전달 특히 표면대 표면 복사열전달 특성은 큰 비선형성과 진공용기의 형상이 복잡할 경우, 형상계수를 구하는 것이 매우 복잡하기 때문에, 단순화된 시스템에 대한 해석이 주로 수행되어 왔다.

본 연구에서는 극저온 냉동기로 냉각되는 소형 극저온 진공용기에서 열침입량을 평가하기 위해, 복사 및 전도 열전달 해석을 수행하였고, 표면의 방사율의 변화 및 형상변화에 따른 열침입량의 변화를 파악하고자 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 진공용기 열전달

진공용기내 잔류 기체를 통한 열전도 및 대류를 무시하면, 용기내 구조물의 열전도에 의한 열전달만을 해석함으로써 열침입량을 구할 수 있다. 이때 진공 매질을 통한 복사열전달은 경계조건으로 고려할 수 있다. 용기내 구조물의 3차원 정상상태 에너지 방정식은 다음과 같다.[2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

한편 경계에서 복사열전달은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{out,i} = \epsilon_i \sigma T_i^4 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N F_{ij} Q_{out,j} \quad (2)$$

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \sum_{A_i} \sum_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{r^2} \pm_j A_i A_j \quad (3)$$

여기서 ϵ_i 는 i 요소의 표면방사율, $\frac{1}{2}$ 는 반사율, σ 는 Stefan-Boltzmann 상수, F_{ij} 는 형태계수를 나타낸다.

2.2 극저온 냉동기 직냉형 진공시스템

해석 대상 극저온 냉동기 직냉형 진공시스템은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 직경 6 mm, 길이 60 mm의 소형 극저온냉동기의 냉각부 및 두께 2 mm의 지지대와 그 주위의 내경 50mm의 진공용기로 구성되어 있다.

이때 극저온냉동기는 저온부의 온도 77K, 고온부의 온도 300K로 운전되는 것으로 가정하였으며, 냉각부의 온도는 소형 극저온냉동기의 운전조건을 고려하여, 선형적인 분포를 갖는 것으로 가정하였다. 한편 해석시 진공용기 및 극저온 냉동기 냉각부의 방사율은 0.26으로 하였으며, 진공용기내 기체에 의한 열전도 및 대류는 무시하였다.

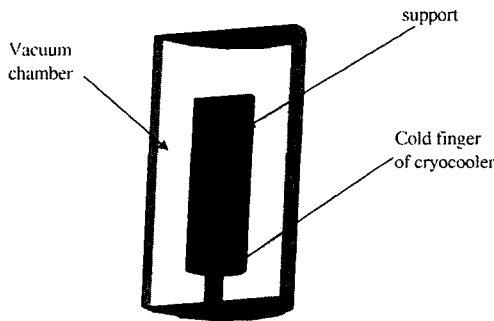


Fig. 1. Schematic diagram of vacuum system

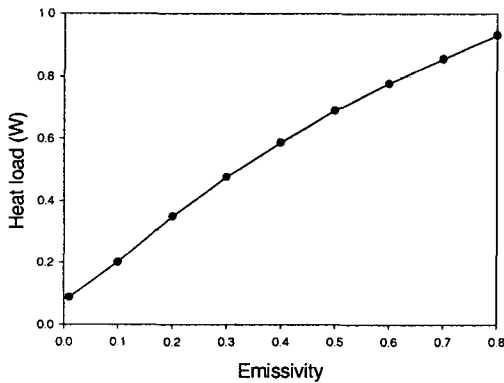


Fig. 2. Heat load at the cold tip of the cryocooler

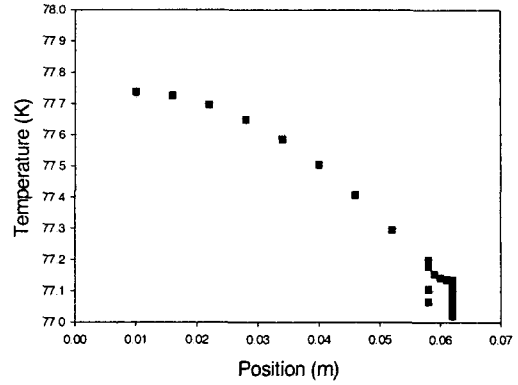


Fig. 3. Surface temperature distribution of the support

해석은 상용 열유동 해석 프로그램인 FLUENTTM[3]를 사용하였다.

Fig.2는 지지대의 방사율 변화에 따른 극저온 냉동기의 부하 즉 열침입량을 나타낸 그림으로 방사율이 증가하면서 열침입량이 증가하며, 방사율이 0.8에 이르면 냉동기의 부하가 1.0에 근접하는 것으로 나타났다.

이는 밀폐공간을 이루는 동심원통(직경 r_1 , r_2)의 경우, 복사열전달에 대한 표현식 (4)에 의해 ϵ_1 이 변화할 때 예측되는 경향과 일치한다.[4]

$$q_{rad} = \frac{\epsilon_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + (1 - \epsilon_2)/\epsilon_2 (r_1/r_2)^2} \quad (4)$$

Fig. 3은 지지대의 방사율이 0.4일때, 지지대의 표면의 온도분포를 나타낸 그림이다. 여기서 가로축은 지지대의 길이방향 위치를 나타낸다. 해석 결과는 냉동기 저온부에서 멀어짐에 따라 급격하게 온도가 상승하여, 지지대의 하부 즉 냉동기 저온부와 가장 먼 쪽에서 최고온도가 발생하나, 온도상승은 1K 미만으로 나타났다.

Fig. 4는 지지대에 4단의 원뿔형 패널을 부착한 형태에 대해, 방사율 변화에 대해 해석한 결과이다.

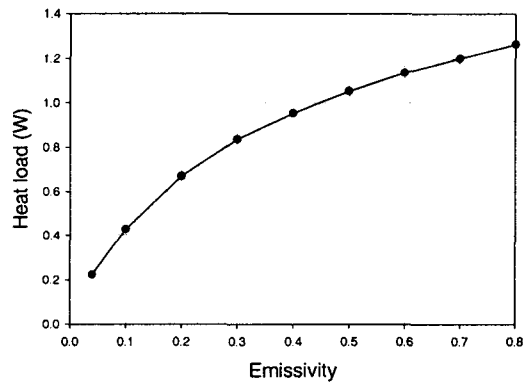


Fig. 4. Heat load at the cold tip of the cryocooler in the vacuum system with the panel

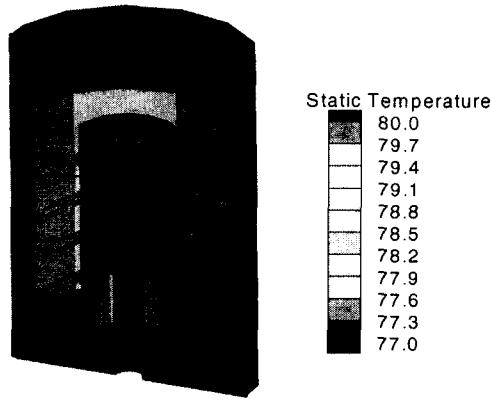


Fig. 5. Temperature distribution of the vacuum system with panel and radiation shield

해석결과는 패널이 설치된 경우에도 패널이 없는 Fig. 2에서의 결과와 같이 방사율의 증가에 따라 냉동기의 부하가 증가함을 알 수 있다. 이때 해석은 패널의 방사율은 일정한 값으로 가정하였고, 지지대의 방사율만이 변화하는 것으로 가정하였다.

해석결과는 부착된 패널로 인해, 패널이 없는 경우보다 냉동기의 부하가 약 1.35 ~ 2.57배 증가하여, 방사율이 0.4를 상회하는 경우 극저온 냉동기의 부하가 1 W를 상회하는 것으로 나타났다. 이는 고온의 진공용기 내벽과 열교환을 수행하는 패널로 인해 지지대만 설치되었을 때 보다 열전달 면적이 크게 증가하였기 때문이다.

이와 같이 극저온 냉동기 냉동부하의 급격한 증가는 실제 시스템의 경우 대다수 소형 극저온 냉동기의 냉동능력이 1 W(냉각온도 77 K)를 넘지 않는 점을 고려할 때[5], 진공용기의 설계시 진공용기 내부 고체 표면의 방사율에 대한 주의 깊은 고려가 요구됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 패널과 복사차폐막(radiation shield)을 부착한 진공시스템에 대한 해석결과로 진공시스템 내부의 표면온도 분포를 나타낸다.

복사차폐막은 극저온시스템에서 MLI(multi layer insulation)와 함께 일반적으로 복사열유속의 감소를 위해 많이 설치되어지며, Al, Sus 등 방사율이 낮은 재질이 주로 사용된다.[6]

극저온 진공펌프 등에서는 주로 2단의 Gifford-McMahon 극저온 냉동기를 사용하여, 복사차폐막의 냉각은 1단이, 흡착재가 부착된 패널의 냉각은 2단이 사용되나, 본 연구에서는 1단의 극저온 냉동기를 설치하는 것으로 가정하여, 패널과 복사차폐막이 77K의 냉동기 저온부와 연결되는 구조로 가정하였다.

해석결과는 진공용기내 복사차폐막의 설치로 인해 시스템 하부에 설치된 패널의 온도는 크게 상승하지 않으나, 고온의 진공용기 내벽과 직접 열교환을 수행하는 상부에 설치된 패널의 경우에는 극저온 냉동기의 저온부와와의 거리가 짧음에도 불구하고, 복사차폐막보다도 상대적으로 높은 80K에 이르는 온도분포가 나타남을 알 수 있다. 이때 극저온 냉동기의 냉각 부하는 복사차폐막이 설치되지 않았을 경우에 비해 약 53%로 감소되는 것으로 나타났다.

한편 해석결과는 주위로 부터의 복사열유속을 좀 더 효과적으로 차단하기 위해서는 복사차폐막 구조의 개선이 필요하며, 복사차폐막을 통해 냉동기의 냉동부하를 크게 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

극저온 냉동기로 냉각되는 소형 극저온 진공용기에서 열침입량을 평가하기 위해, 복사 및 전도 열전달 해석을 수행하였고, 표면의 방사율의 변화 및 형상변화에 따른 열침입량의 변화를 파악하고자 복사열전달 해석을 수행하였다.

해석결과 진공용기 내부 구조물 표면의 방사율이 극저온 냉동기의 부하량에 큰 영향을 미치며, 복사차폐막의 설치를 통해 상당한 부분의 극저온 냉동기 냉동부하 감소를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 1999년도 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Roth, "Vacuum Technology", North-Holland Publishing Company, 1978
- [2] J. P. Holman, "Heat transfer", McGraw-Hill Book Company, 1986
- [3] Fluent Inc., "FLUENT User's Guide", 2001
- [4] Robert Siegel, "Thermal radiation heat transfer", Hemisphere Publishing Coporation, 1981
- [5] G. Walker and E. R. Bingham, "Low-Capacity Cryogenic Refrigeration", Clarendon Press, 1994
- [6] John G. Weisend II, "Handbook of Cryogenic Engineering", Tayler & Francis, 1998