

주위온도조건이 스테링 극저온냉동기의 성능에 미치는 영향

Effects of the environmental temperature on the performance of the Stirling cryocooler

홍용주^{1,*}, 김효봉¹, 박성제¹

Yong-Ju Hong^{1,*}, Hyo-Bong Kim¹, Seong-Je Park¹

Abstract: The Stirling cryocoolers have been widely used for the cooling of the infrared detector(InSb, HgCdTe, and etc.) and HTS(High Temperature Superconductor) to the cryogenic temperature. The monobloc Stirling cryocoolers with the rotary compressor are applicable to the cooling device for the compact mobile thermal imaging system, because the cryocoolers have the compact structure and light weight. The typical performance factors of the Stirling cryocooler are the cool-down time, cooling capacity at the desired temperature (80 K), the electric input power and COP. The above performance factors depend on the operating conditions such as the charging pressure of the helium gas, the thermal environment and etc.. In this study, the effects of the thermal environment (temperature of 241, 293, and 333 K) on the performance of the cryocooler were investigated by experiments. The results show the effects of the temperature of the thermal environment on the cooling capacity and input power.

Key Words: Stirling cryocooler, environmental temperature, operating frequency.

1. 서 론

일체형 스테링 극저온냉동기/적외선검출기(IDCA, Integrated Dewar/Cryocooler Assembly)는 팽창기의 저온끝단에 적외선 검출기를 직접 부착하여 사용하는 방식으로, 냉동기와 적외선검출기가 분해/결합이 가능한 분리형에서 냉동기의 저온끝단과 적외선 검출기를 열적으로 연결하는 링크를 사용함으로써 발생하는 냉동기와 검출기의 온도차를 최소화할 수 있어 냉동기의 열부하를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 낮은 전력으로 운용이 가능한 장점을 지니고 있다[1].

본 연구에서의 일체형 스테링 극저온냉동기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 BLDC(Brushless DC motor) 방식의 회전모터 및 모터에 의한 회전운동을 직선운동으로 변환하는 크랭크 기구, 압력파형을 발생시키는 압

축피스톤 및 실린더로 구성된 회전형 압축기와 극저온의 환경을 유지, 생성하기 위한 재생열교환기(regenerator), 강제구동 방식의 변위기(displacer)로 구성된 팽창기, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결판으로 구성되며, 압축기 및 팽창기는 하나의 하우징에 결합되는 일체형 구조이다.

스테링 극저온냉동기는 고압의 헬륨으로 충전되며, 압축기 피스톤과 팽창기의 변위기는 효율적인 극저온의 발생 및 유지를 위해 일정한 위상차를 유지하여야 한다. 압축기 피스톤에 의해 압축된 헬륨가스가 연결판 및 재생기를 통해 팽창공간으로 유입되는 과정 중, 변위기내에 충전된 재생물질과의 열전달을 통해 충분히 냉각되고, 팽창공간의 연속적인 체적변화(팽창)에 의해 극저온이 발생되고, 유지된다.

일반적으로 스테링 극저온냉동기는 초기 냉각과정에서는 짧은 냉각소요시간을 위해 최대의 입력전력으로 운전된다. 설정온도(80 K)에 도달한 이후에는 경제적인 운전을 위해 최소의 입력전력으로 운전된다. 이때 냉동기의 제어방식은 회전형 압축기의 경우 회전수의 제어를 통해 수행되며, 압축기의 회전수를 제어하는 제어기는 저온끝단에 부착된 온도센서의 신호를 통해 피드백제어를 수행한다.

정상상태의 냉동기는 주위로부터의 열부하 및 적외선 검출기의 열부하와 평형을 이루는 냉동능력의 상태로 운전되며, 주위로부터의 열부하에 따라 정상상태의 운전조건이 변화하게 된다. 스테링 극저온냉동기는 다양한 열적환경에 노출되어 운용되며, 이와 같은 운용 환경에서도 주어진 입력전력 조건에서 저온끝단의 온도를 일정하게 유지할 수 있어야 한다.

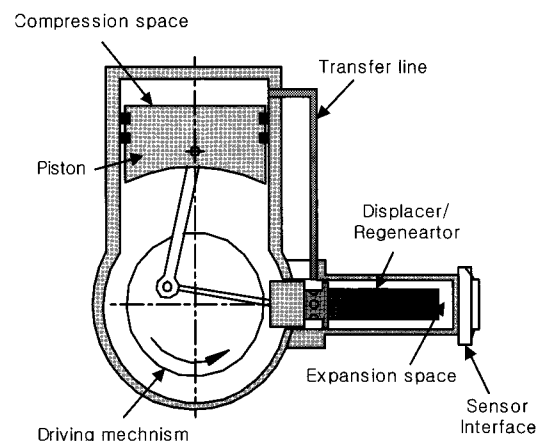


Fig. 1. Schematic diagram of the rotary Stirling cryocooler.

¹정 회 원 : 한국기계연구원 에너지플랜트연구본부

*교신저자 : yjhong@kimm.re.kr

원고접수 : 2009년 08월 10일

심사완료 : 2009년 09월 07일

게재확정 : 2009년 09월 07일

Table 1. Specification of the Stirling cryocooler.

| Item | Specification |
|---------------------|-------------------|
| Type | Integral / Rotary |
| Cooling capacity | > 0.5 W @80 K |
| Input power | < 15 W |
| Input voltage | 20 - 30 VDC |
| Dia. of cold finger | < 8 mm |
| Weight | < 500 g |

본 연구에서는 운용 주위온도의 변화에 따른 냉동기의 특성변화를 고찰하기 위해, MIL 규격[2]에서 정의하고 있는 저온(241 K), 상온(293 K), 고온(333 K) 조건에서의 소형 일체형 스티어링 극저온냉동기를 성능변화에 대한 실험적 연구를 수행하였고, 최대입력 전력으로 운전될 때(냉동기의 온도제어기능을 사용하지 않는 경우) 및 냉동기의 저온끝단을 80 K로 제어 운전할 때의 입력전력, 냉동능력 등 냉동기의 운전특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 일체형 스티어링 극저온냉동기의 사양은 Table 1에 나타난 바와 같이 80 K에서 최대냉동능력이 0.5 W급인 냉동기로 팽창기의 직경은 약 8 mm이며, 입력전원은 20 - 30 VDC까지 공급가능한 스티어링 극저온냉동기이다[3]. 실험은 스티어링 극저온냉동기의 팽창기를 적외선 검출기 냉각 환경을 모사하기 위한 모사검출기(Simulation Dewar)에 결합하여 수행하였으며, 모사검출기는 주위로부터의 열손실을 최소화하기 위해 고진공펌프를 통해 용기 내부를 진공배기한 후 배기관을 밀봉하였다.

실험은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 각 주위온도 조건(241/293/333 K)으로 설정된 환경챔버에서 일정 시간 이상 냉동기를 보관하여 전체 냉동기가 환경조건의 온도에 도달한 후, 냉동기를 28 VDC의 전원을 인가하여 운전하고, 저온끝단의 온도가 주위온도에 도달한 후, 측정을 수행하였다. 이때 냉동기의 운전으로 인해 발생하는 열로 인해 실험 중 냉동기 고온부의 온도가 주위온도보다 크게 상승하는 것을 방지하기 위해 냉동기의 고온부에 방열판을 장착하였다.

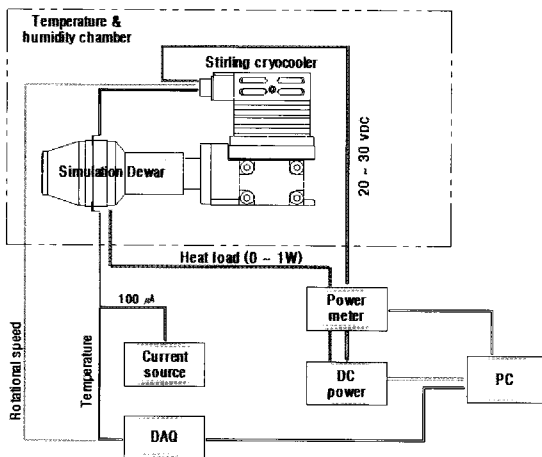


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental facility.

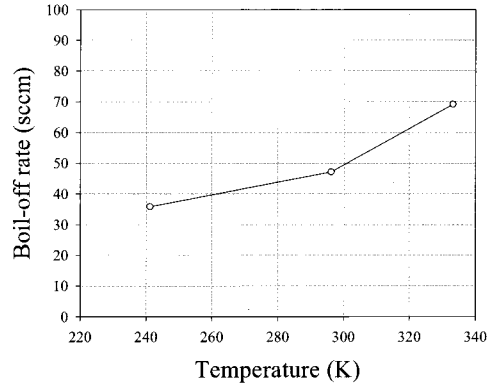


Fig. 3. Boil-off rate of the simulation Dewar with respect to the environmental temperature.

Fig. 3은 액체질소 증발법[4]을 통해 측정된 주위온도의 변화에 따른 모사검출기의 정상상태 질소 증발량(열부하에 해당)을 나타낸다. 모사검출기의 열부하는 냉각기 저온끝단 주위로부터의 복사열전달과 팽창기를 통한 전도열전달로 인해 발생하며, 저온조건인 경우 상온에 비해 약 75%, 고온의 경우 상온의 약 1.5배의 열부하가 발생하는 것으로 나타났다.

실험은 냉동기가 최대의 입력전력으로 구동될 때 최저도달온도를 구한 후, 냉동기의 저온끝단에 열부하를 인가하여 열부하에 따른 안정 온도를 구하였다.

또한 제어운전시의 냉동기 특성을 구하기 위해 80 K의 온도로 제어될 때 저온끝단의 열부하를 조절하여, 정상상태에서의 냉동기 특성을 구하였다.

스티어링 극저온냉동기의 운전특성을 구하기 위해 냉동기로 공급되는 전원특성(전압/전류/전력)을 전력계를 통해 측정하였고, 모터의 고정자에 설치된 홀센서를 통해 냉동기의 회전수를 측정하였다. 한편 온도의 측정은 팽창기 저온끝단에 부착된 2개의 반도체 온도센서에 100 μA의 전류를 인가하여 이때 발생하는 전압강하를 통해 측정하였으며, 이때 온도센서의 출력은 냉동기의 제어 및 온도검출을 위해 사용된다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 최대 입력전력 조건에서 주위온도변화에 따른 냉동기의 냉동능력 변화를 나타낸 그림이다. 스티어링 극저온냉동기의 냉동능력은 저온끝단의 온도가

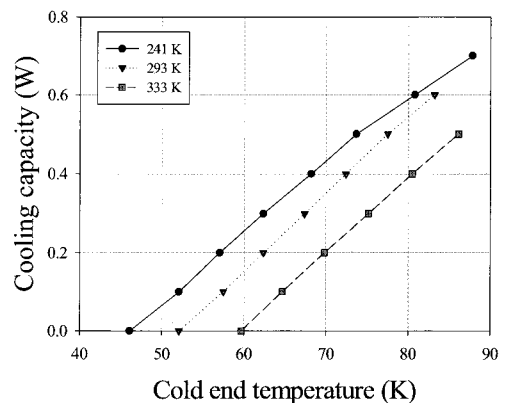


Fig. 4. Cooling capacity vs. cold end temperature with varying the environmental temperature.

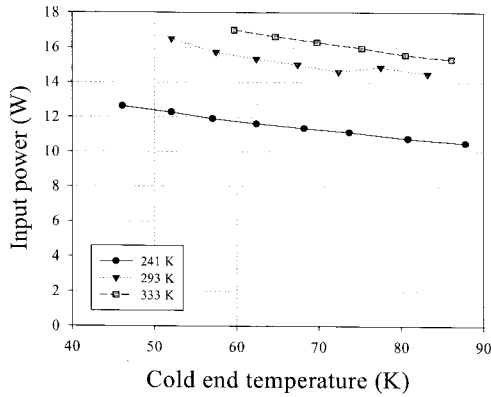


Fig. 5. Input power vs. cold end temperature with varying the environmental temperature.

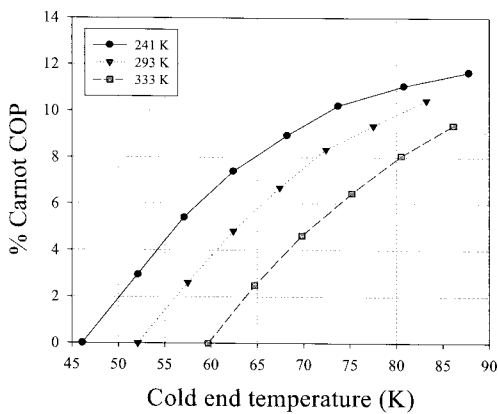


Fig. 6. % Carnot COP vs. cold end temperature with varying the environmental temperature.

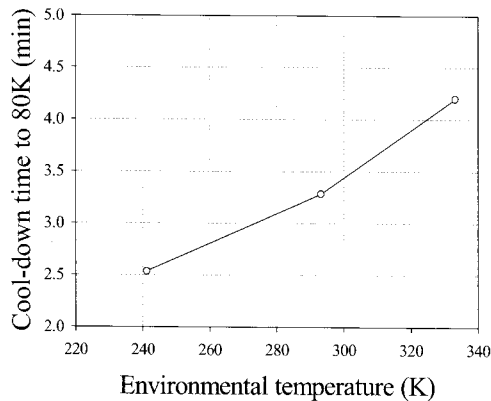


Fig. 7. Cool-down time of the cryocooler with respect to the environmental temperature.

상승함에 따라 각종 열손실의 감소로 인해 선형적인 냉동능력 증가가 발생하였다. 주위온도의 상승은 냉동기의 고온부에서 저온부로의 열침입을 증가시키고 이로 인해 유효 냉동능력의 감소를 유발한다. 따라서 주위온도가 상승하면 최저도달온도가 상승하고, 동일한 저온부 온도에서의 냉동능력의 감소가 발생하였다. 저온 끝단온도 80 K일 때 냉동기의 냉동능력은 저온조건에서 약 0.58 W, 상온 약 0.54 W, 고온조건 약 0.4 W로 나타나, 주위온도에 따른 모사저온용기의 열부하 증가와 유사한 특성을 나타내었다.

Fig. 5는 주위온도변화에 따른 냉동기의 입력전력변화를 나타낸 그림으로, 저온끝단의 온도가 상승할수록 부하의 감소로 인해 입력전력이 감소하는 것으로 나타났고, 냉동능력과는 반대로 저온 환경조건에서 가

장 작은 입력전력이 소모되는 것으로 나타났다.

스테링 극저온냉동기의 압축피스톤 및 변위기에 의해 생성되는 PV일(W_{PV}) 및 압력은 다음과 같이 냉동기의 회전수 및 평균 가스압력 등에 의해 영향을 받는다[5].

$$W_{PV} \propto \omega P_o V_o f(\theta) \quad (1)$$

$$P \left(\frac{V_c}{T_c} + \frac{V_e}{T_e} + \frac{V_r}{T_r} + \frac{V_{bf}}{T_{bf}} \right) = const \quad (2)$$

여기서 ω 는 회전각속도, P_o 는 운전 중 냉동기 내부의 사이클 평균 헬륨가스압력, V_o 는 피스톤의 행정체적 θ 는 압축 피스톤과 변위기의 위상차, V 는 체적, T 는 온도, 하첨자 c는 압축공간, e는 팽창공간, r은 재생기, bf는 버퍼공간을 각각 나타낸다.

주위온도 변화로 인해 유발되는 주위로부터 냉동기로 유입되는 열부하의 변화는 저온끝단의 열부하 뿐만 아니라 식(2)에서 버퍼공간(냉동기 고온부) 충전가스의 온도변화를 유발하고 이로 인해 평균압력의 변화를 유발한다. 이와 같은 충전가스 압력의 변화는 압축기의 운전특성에 큰 영향을 미치며, 냉동기의 입력전력에 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 주위온도에 따른 % 카르노 성적계수를 나타낸 그림이다. 저온끝단의 온도가 증가하면서 % 카르노 성적계수가 증가함을 알 수 있으며, 그 증가의 경향은 선형적이지 않음을 알 수 있다. 또한 저온끝단의 온도가 80 K의 경우 241 K의 주위온도에서 약 11%를 나타내었다. 이와 같은 주위온도에 따른 냉동기의 성능특성의 변화는 냉동기의 주위온도를 낮게 유지할수록 고효율의 냉각이 가능함을 제시하고 있다. 따라서 주어진 환경조건에서는 냉동기에서의 발열을 주위로 잘 방열하여 냉동기의 내부온도가 크게 상승하지 않도록 하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 주위온도에 따른 냉동기의 저온끝단의 온도가 80 K에 도달하는 데 까지 소요되는 냉각시간을 나타낸 그림이다. 실험결과 상온조건(293 K)에서 냉동기의 냉각시간은 3분 17초로 나타났으며, 냉동기의 냉각시간은 주위온도의 상승에 따라 발생하는 냉동기 및 검출기 저온부의 열질량(thermal mass)의 증가 및 열부하의 증가로 인해 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8-10은 각각 저온끝단의 온도가 80 K로 일정하게 유지될 때 주위온도의 변화 및 회전수의 변화에 따른 냉동능력, 입력전력, % 카르노 성적계수를 나타낸 그림이다.

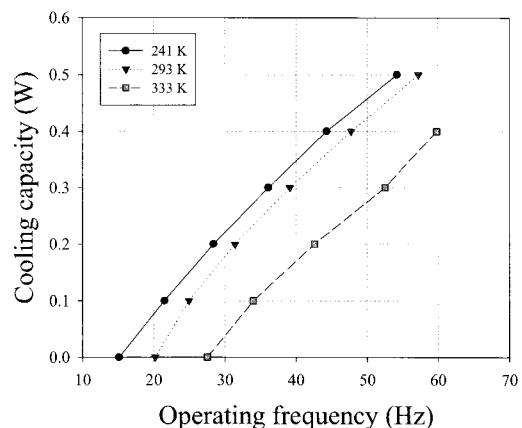


Fig. 8. Cooling capacity vs. operating frequency of the cryocooler at the cold end temperature of 80 K.

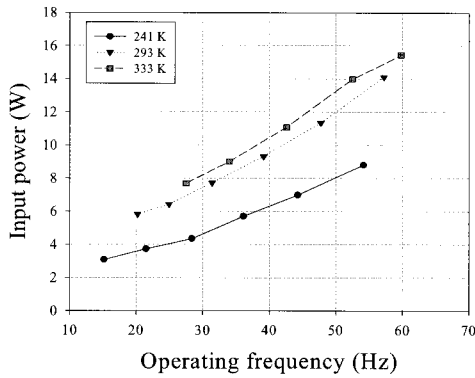


Fig. 9. Input power vs. operating frequency of the cryocooler at the cold end temperature of 80 K.

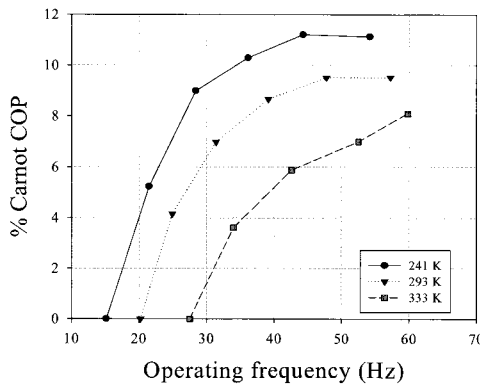


Fig. 10. % Carnot COP vs. operating frequency of the cryocooler at the cold end temperature of 80 K.

Fig. 8의 회전수에 따른 냉동능력의 변화에서 알 수 있는 바와 같이 주위온도의 변화에 따라 무부하조건에서의 회전수가 변화하며, 열부하의 증가에 대응하기 위해 냉동기의 회전수가 증가함을 알 수 있다. 한편 입력전력은 무부하운전의 경우 고온조건에서 8 W 이하로 나타났으며, 주위온도가 상승할수록 높은 입력전력이 요구되며, 저온조건에서 약 3 W로 저온끝단의 온도를 80 K로 유지할수 있는 것으로 나타났다.

실험결과는 스텔링 극저온냉동기 모터의 회전수 증가가 냉동능력의 증가를 발생하며, 주위온도의 상승은 저온부온도가 80 K로 유지될 때에도 최대입력전력으로 운전될 때와 같이 동일한 회전수에서 냉동능력을 감소시킴을 알 수 있다. 이때 입력전력은 회전수 증가에 따라 증가하며, 주위온도에 대해 최대입력전력 운전시와 동일한 경향을 나타내고 있다.

스텔링 극저온냉동기의 % 카르노 성적계수는 저온 및 상온 환경조건에서 약 0.5 W의 부하조건에서 운전될 때 최고의 효율을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 주위온도의 변화에 따른 스텔링 극저온냉동기의 특성변화를 고찰하기 위해, 저온(241 K), 상온(293 K), 고온(333 K) 조건에 대해 냉동기의 특성 실험을 수행하였다.

실험결과 고온의 환경조건에서 냉동기의 냉동능력, 입력전력 등의 운전특성이 가장 열악하게 나타났다. 또한 80 K의 온도조건에서 동일한 냉동능력을 유지하기 위해서 높은 냉동기의 회전수를 요구하는 것으로 나타났다. 이와 같은 실험결과는 주위온도에 따른 냉

동기의 성능특성의 변화는 냉동기의 주위온도를 낮게 유지할수록 고효율의 냉각이 가능함을 제시하고 있다. 따라서 주어진 환경조건에서는 냉동기에서의 발열을 주위로 잘 방열하여 냉동기의 내부온도가 크게 상승하지 않도록 하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원의 주요사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Walker, "Miniature Refrigerator for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, Oxford, 1989.
- [2] United States Department of Defense, MIL-STD-810F, 01 JAN 2000.
- [3] S. J. Park, Y. J. Hong, H. B. Kim, Y. H. Kim, "A study on the performance characteristics of rotary type Stirling cryocooler", J. of KIASC, Vol. 8, NO. 1, pp. 54-58, 2006.
- [4] Y. M. Kim, B. H. Kang, S. J. Park, "Experimental Study on the Thermal Load of a Cryochamber with Radiation Shields ", J. of SAREK, Vol. 20, NO. 1, pp. 11-17, 2008.
- [5] I. Urieli, D. M. Berchowitz, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984.

저 자 소 개



홍용주(洪溶柱)
1968년 3월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원.



박성제(朴聖濟)
1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.



김효봉(金孝峰)
1960년 4월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 2003년 충남대 공대 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임기술원.