

회전압축기형 스텔링냉동기의 성능에 관한 실험적 연구

홍용주[†], 박성제, 김효봉, 김양훈*, 최영돈**

The Experimental Study of the Performance of the Rotary Stirling refrigerator

Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Yang-Hoon Kim
and Young-Don Choi

Key Words: Stirling Refrigerator(스텔링냉동기), Rotary Compressor(회전압축기), Cooling Performance(냉각성능), Thermal Load(열부하), Dewar(듀어)

Abstract

The Stirling refrigerators have been widely used for the cooling of the infrared detector and HTS to the cryogenic temperature. The Stirling refrigerator with the rotary compressor are applicable to the cooling device for the compact mobile thermal imaging system, because the refrigerators have the compact structure and light weight. The typical performance factors of the Stirling refrigerator are the cool-down time, cooling capacity at the desired temperature and the input power. And the above performance factors are depends on the thermal insulation characteristics of the Dewar. In this study, the steady thermal load of the Dewar and the performance of the Stirling refrigerator were measured. The results show the dependency of the input power and the charging pressure on the performance of the refrigerator.

기호설명

- h : 엔탈피 (J/kgK)
 \dot{m} : 질량유량 (sccm)
 Q : 저온부 열침입량 (W)

1. 서 론

스텔링냉동기는 Gifford - McMahon 냉동기와 더불어 다양한 상업적 분야에서 활용도가 매우

높은 극저온냉동기이다. 스텔링냉동기의 적용분야는 주로 액체질소 온도(NBP, Normal Boiling Point) 수준인 77K 부근에서 1W 미만의 비교적 작은 냉각성능을 요구하는 적외선센서, 액화, 고온초전도체 등의 냉각이 있다.

스텔링냉동기의 개발 초기에는 회전모터를 사용하는 회전압축기형 스텔링냉동기의 제한적인 수명/신뢰성으로 인하여, 다양한 분야에서 한계(cryogen)의 활용을 크게 대치하지는 못하였으나, 기존의 교류 회전모터의 수명을 획기적으로 개선한 BLDC 모터를 채용한 회전 압축기 및 회전 압축기의 단점을 획기적으로 개선한 이동자석(moving magnet)형 선형모터(linear motor), 판스프링(flexure bearing) 등을 채용한 선형압축기의 도입으로 스텔링냉동기의 수명/신뢰성 뿐만 아니라, 냉각효율의 획기적인 개선에 힘입어, 그 활용분야가 점차 확대되고 있는 상황이다.^(1,2)

최근에는 삶의 질 향상을 위한 정보·전자기기의

[†] 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

E-mail : yjhong@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7366 FAX : (042)868-7335

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** 고려대학교 기계공학과

급속한 소형, 휴대형화 추세에 부응하여, 스텔링 냉동기의 주 활용영역인 적외선 진단 시스템의 이동성/휴대성에 대한 요구가 증대되고 있다. 이에 따라 적외선 진단시스템의 경량화, 소형화를 위한 고효율의 소형, 경량 스텔링냉동기에 대한 수요가 크게 증대되고 있다.

본 연구에서의 일체형 로타리 스텔링냉동기는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 BLDC 회전모터에 의한 회전운동을 직선운동으로 변환하는 크랭크 기구, 압력파형을 발생시키는 압축피스톤 및 실린더로 구성된 회전형 압축기와 극저온의 환경을 유지, 생성하기 위한 재생열교환기(regenerator), 강제구동 방식의 변위기(displacer)로 구성된 팽창기, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관으로 이루어져 있다.

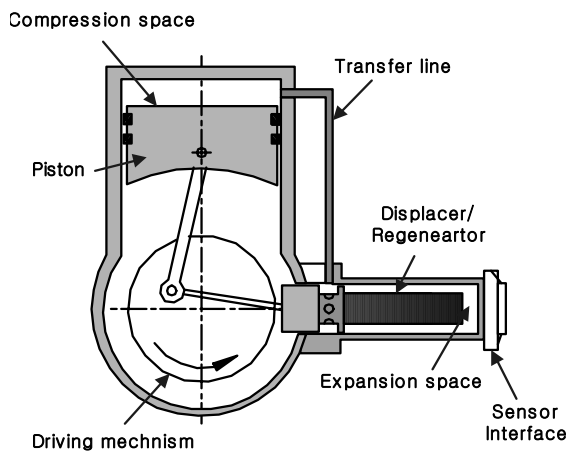


Fig. 1 Schematic diagram of the rotary Stirling refrigerator

스텔링냉동기는 고압의 헬륨으로 충전되며, 압축기 피스톤과 팽창기의 변위기는 효율적인 극저온의 발생 및 유지를 위해 일정한 위상차를 유지하여야 한다.

압축기 피스톤에 의해 압축된 헬륨가스가 연결관 및 재생기를 통해 팽창공간으로 유입되는 과정 중, 변위기내에 충전된 재생물질과의 열전달을 통해 충분히 냉각되고, 팽창공간의 연속적인 체적변화(팽창)에 의해 극저온이 발생되고, 유지된다.

본 연구는 최근 수요가 급증하고 있는 적외선 센서 냉각용(냉각온도 77K, 냉동능력 약 0.5 W 급, 소요동력 20 W미만) 일체형 스텔링냉동기의

운전특성 파악을 목적으로, 소형 회전압축기형 스텔링냉동기시스템을 대상으로 듀어의 열부하, 스텔링냉동기의 성능 및 냉동능력을 실험적으로 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 진공용기 냉동부하 평가

스텔링냉동기의 운전특성은 고온의 주위로부터의 열침입 즉 진공용기(듀어)의 열성능에 의해 크게 영향을 받는다.

고온으로부터 스텔링냉동기의 저온부로의 열침입은 크게 복사/대류/전도 열손실로 구분되며, 이와 같은 열침투 경로를 차단하여 열손실을 최소화하기 위해, 스텔링냉동기의 저온부는 일반적으로 진공용기 내에 설치되고, 급격한 온도구배가 발생하는 진공용기의 내벽은 낮은 열전도도의 소재 또는 최소의 두께로 설계되어 진다.

본 연구에서는 진공용기를 통한 열침입량을 평가하기 위해 정상상태에서의 액체질소(LN2) 증발률 시험^(3,4)을 수행하였다.

Fig. 2는 액체질소(LN2) 증발률 시험장치로, 실험은 스텔링냉동기의 팽창기를 진공용기에 설치하고, 진공용기를 터보진공펌프를 통해 충분히 배기하여 일정한 진공도를 유지하도록 한 후, 팽창기 저온부에 액체질소를 주입한 후, 증발되는 액체질소 증발량을 질량유량계를 통해 측정하였다. 이때 저온부 열부하는 저온부에 부착된 열선을 통해 인가하였다.

정상상태에서는 저온부로의 열침입량은 다음과 같이 액체질소의 증발잠열과의 열평형을 이루게 된다.

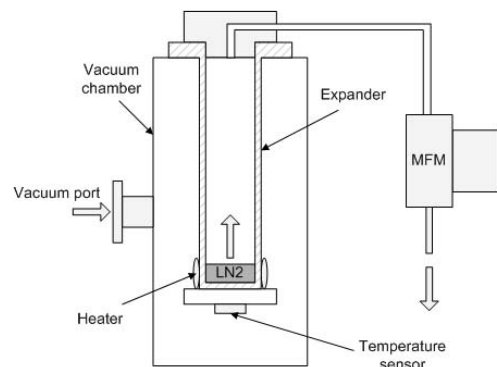


Fig. 2 Experimental apparatus for boil-off test

$$Q_{no-load} = \dot{m}_{no-load} h_{fg} \quad (1)$$

한편 저온부에 열부하를 인가하는 경우에는 다음과 같은 에너지 평형이 만족된다.

$$Q_{load} = Q_{no-load} + \Delta Q = (\dot{m}_{no-load} + \Delta \dot{m}) h_{fg} \quad (2)$$

따라서 저온부의 정상상태 열침입량은 다음의 관계를 만족한다.

$$Q_{no-load} = \frac{\Delta Q}{\Delta \dot{m}} \dot{m}_{no-load} \quad (3)$$

이때 식(3)의 기울기는 다수의 열부하를 인가하여 구하였다.

진공용기 열침입량 측정에 사용된 진공용기는 스테인레스강 재질로, 내경 26 mm, 길이 80 mm 이고, 팽창기 실린더는 스테인레스강 재질의 외경 7.6 mm, 진공용기 내에 설치된 길이는 45 mm 이다.

2.2 스텔링냉동기의 성능평가

스텔링냉동기의 성능은 크게 저온부의 온도가 80K에 도달하는 데 소요되는 냉각시간, 냉동능력, 입력전력으로 평가할 수 있다.

본 연구에서는 소형 일체형 스텔링냉동기의 성능을 평가하기 위해, 냉동기의 입력전력 및 충전압력의 변화에 따른 냉각시간 및 냉동능력을 측정하였다.

성능평가용 스텔링냉동기는 중량 450g, 최대입력전력 17W의 특성을 지닌 BLDC 모터를 채용한 소형 회전압축기형 스텔링냉동기이다.

스텔링냉동기의 작동유체로는 불순물의 유입으로 인한 성능저하를 억제하기 위해 고순도의 헬륨을 충분한 배기과정을 거친 후 충전하였다.

스텔링냉동기의 성능평가는 스텔링냉동기의 팽창기를 진공용기 내에 설치한 후, 주위로부터의 열침입을 차단하기 위해 진공용기를 터보진공펌프로 충분히 배기하여, 일정한 진공도를 유지시킨 후, 입력전력을 인가하여 스텔링냉동기를 구동하여 저온부의 온도가 77K에 도달할 때까지의 냉각시간 및 입력전력을 측정하였다. 실험 중 입

력조건은 운전 초기인가 전압으로 일정하게 유지하였다.

한편 냉동능력의 측정은 저온부에 부착한 열선을 통해 열부하를 인가한 후, 스텔링냉동기의 정상상태 열평형에 도달하였을 때 저온부 온도를 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진공용기 냉동부하 평가

Fig. 3은 무부하시 LN2 증발률 및 저온부의 온도를 나타낸 그림이다. LN2 주입초기에는 급속한 저온부 온도의 강온 및 매우 큰 증발량을 나타내나, 약 2분이 경과한 후에는 저온부의 온도가 정상상태에 도달하고 LN2 증발량이 급속하게 줄어들어 14분 이후에는 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 또한 약 16분에는 LN2의 증발로 인해 저온부 온도의 급격한 상승이 발생함을 알 수 있다.

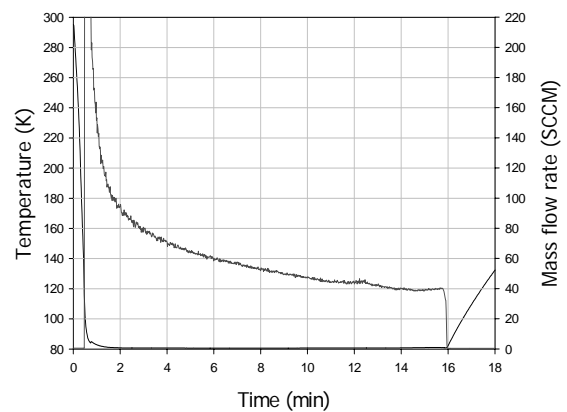


Fig. 3 LN2 flow rate during boil-off test

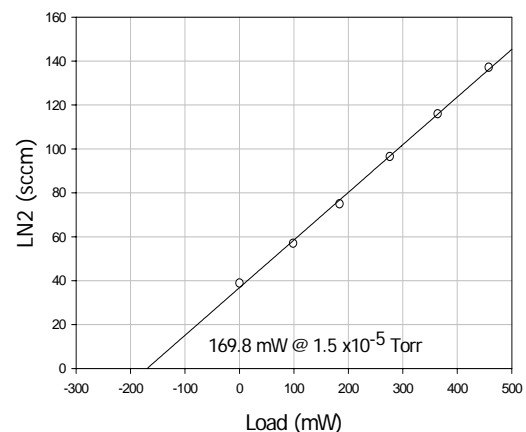


Fig. 4 Results of the boil-off test

이때 진공용기의 진공도는 약 1.5×10^{-5} torr이며, 무부하시 진공용기의 열침입량은 약 40 sccm임을 알 수 있다.

Fig. 4는 팽창기 저온부에 열부하를 인가하였을 때 측정된 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 열부하를 인가한 경우 LN2 증발량은 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 식 (3)의 관계를 적용하면, 진공용기의 진공도가 1.5×10^{-5} torr로 유지될 때 무부하시 진공용기의 열침입량은 170 mW임을 알 수 있다.

이와 같은 진공용기의 열침입량은 진공용기의 벽을 통한 전도열손실이 100mW를 상회하는 점을 고려할 때 진공용기의 진공도를 10^{-5} torr로 유지할 때 복사열손실은 전도열손실보다 작게 발생하고, 진공용기내의 기체로 인한 전도열손실은 매우 작아짐을 의미한다.

3.2 스텔링냉동기의 성능평가

스텔링냉동기의 충전압력 및 운전주파수(인가전압)는 입력전력 및 냉동능력에 큰 영향을 미친다. Fig. 5는 냉동기의 충전압력이 35 bar의 경우, 스텔링 냉동기의 입력전력의 변화에 따른 냉각특성을 나타낸 그림이다. 이때 실험은 일정한 전압을 인가하면서 수행하였고, 측정된 냉동기 입력전력은 인가전압에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 또한 측정된 입력전력은 저온부온도가 강온하면서 점차적으로 증가하였으며, 그림에 나타난 입력전력은 정상상태에서의 값을 의미한다. 측정결과 냉동기 입력전력의 증가는 냉동기 초기 강온속도 및 최저도달온도에도 영향을 미침을 알 수 있다. 인가전압이 24V의 경우 저온부 온도 80K 도달시간은 약 3.8분, 최저도달온도 59.7K로 나타났다.

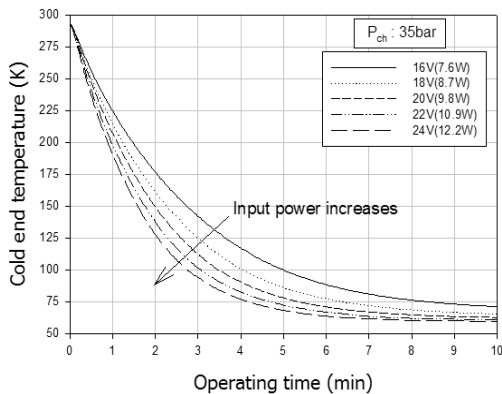


Fig. 5 Cool-down characteristics

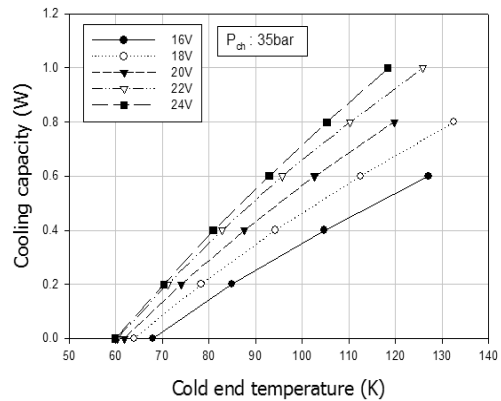


Fig. 6 Cooling capacity

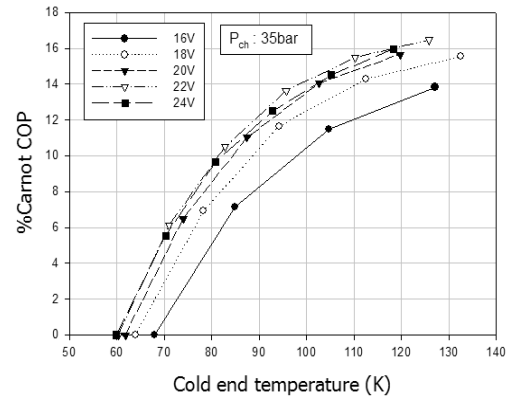


Fig. 7 % Carnot COP

Fig. 6은 인가전압 변화에 따른 냉동기의 냉동능력을 나타낸 그림이다. 인가전압의 증가에 따른 냉동능력의 변화는 Fig. 5에서 냉각속도에서 알 수 있는 바와 같이 인가전압의 증가함에 따라 냉동능력이 증가하는 것으로 나타났다. 이때 저온부의 온도가 증가함에 따라 증가하는 냉동능력의 기울기는 인가전압이 큰 경우, 즉 입력전력이 큰 경우가 큰 기울기를 나타내었다. 인가전압 24V의 경우 저온부 온도 80K에서 냉동능력 약 0.4W로 나타났다.

Fig. 7은 인가전압 변화에 따른 % Carnot COP를 나타낸 그림이다. 저온부 온도의 증가 및 인가전압의 증가는 % Carnot COP의 증가를 유발함을 알 수 있으며, 인가전압 22V와 24V의 경우는 큰 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 % Carnot COP는 저온부의 온도가 증가할 수록 그 증가율이 감소하고, 인가전압 24V의 경우, 저온부 온도 80K일때 약 9%를 상회하는 것으로 나타났다.

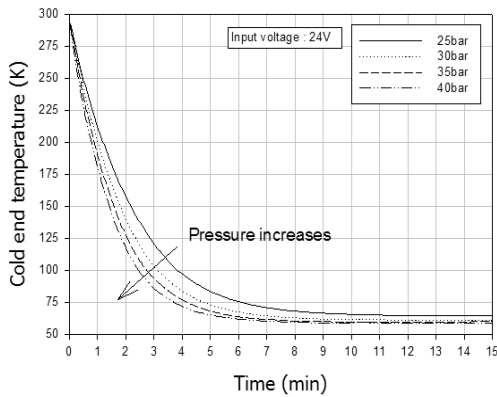


Fig. 8 Cool-down characteristics of the Stirling refrigerator with varying charging pressure

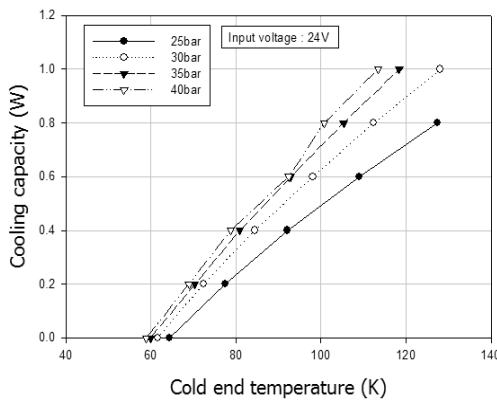


Fig. 9 Cooling capacity of the Stirling refrigerator with varying charging pressure

Fig. 8은 충전압력의 변화에 따른 스티어링냉동기의 냉각특성을 나타낸 그림으로, 이때 인가전압은 24V이다. 실험결과 충전압력의 증가는 인가전압의 증가 경우와 같이 냉각속도의 증가를 유발하는 것으로 나타났다. 그러나 그 증가의 경향은 충전압력이 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다.

충전압력 40 bar의 경우에는 저온부 온도 80K 도달시간이 약 3.37분, 최저도달온도 58.9K로 나타났다. 따라서 충전압력 40bar의 결과는 최저도달온도 측면에서는 충전압력 35bar와 큰 차이가 발생하지 않았으나, 80K 도달시간 측면에서는 약 10% 이상의 시간이 단축되었다.

Fig. 9는 충전압력의 변화에 따른 스티어링 냉동기의 냉동능력을 나타낸 그림이다. 충전압력의 증가에 따라 측정 온도 영역에서 냉동능력의 증가가 발생하는 것으로 나타났다.

충전압력 40 bar의 경우 저온부 온도 80K에서

냉동능력은 0.4W를 상회하는 것으로 나타났으며, 충전압력 25 bar의 경우 급격한 냉동능력의 감소가 발생하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

일체형 스티어링냉동기의 운전특성 파악을 목적으로, 소형 회전압축기형 스티어링냉동기시스템을 대상으로 듀어의 열부하, 스티어링냉동기의 성능 및 냉동능력을 실험적으로 평가하였다. 측정 결과 진공용기의 충분한 진공배기를 통해 진공용기 내의 가스로 인한 전도열손실을 억제할 수 있고, 복사열손실은 진공용기 벽을 통한 전도열손실에 비해 작은 것으로 나타났다. 스티어링냉동기의 충전압력 및 입력전력은 냉동능력 및 입력전력 등 냉동기의 성능에 큰 영향을 미친다.

후 기

본 연구는 2003년도 민군겸용기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) R. Radebaugh, 1996, "Application, fundamentals, thermodynamics, classification, type of cryocoolers, cryocooler problem", Workshop on cryogenic refrigeration technology at the Korea Institute of Machinery & Materials, KIMM
- (2) Sang-Kyu Choi, Seong-Je Park, Yong-Ju Hong, Hyo-Bong Kim, 2002, "A newly devised linear flexure bearing with arc shaped flexure blades for cryogenic applications", Proceedings of Japan-Korea Joint Workshop on Applied Supercon. & Cryogenics, pp. 37
- (3) Judson Technologies, 2003, "JTC Joule-Thomson Cryostat Cooling System Operation manual"
- (4) Ricor, 2003, "Boil-Off Rate Measurement", Ricor