

일체형 스텔링 냉동기 성능에 미치는 주요 인자에 관한 연구

A Study on the Principal Factors for the Stirling Refrigerator Performance

김대웅¹, 박성제^{2*}, 홍용주², 김효봉², 고상철³

D.W. Kim¹, S.J. Park^{2*}, Y.J. Hong², H.B. Kim², S.C. Ko³

Abstract: Performance of integral type Stirling refrigerator used for cooling infrared detector is affected by principal factors such as design factors and operating factors. Operating factors include charging pressure and operating frequency. The purpose of this paper is to examine the basic design analysis on the integral type Stirling refrigerator and the changes in performance through experiments on operating factors.

Key Words: integral type Stirling refrigerator, performance, cooling capacity, charging pressure, diving frequency.

1. 서 론

스털링 냉동기(Stirling Refrigerator)는 1860년대 Scotland의 A. Kirk에 의해 스텔링 엔진 사이클을 냉동기의 형태로 개발한 이후에 주로 적외선 탐상장비에 장착되어 적외선소자를 80K 이하의 온도로 냉각시키는 냉동기다. 최근 전자기기 등의 급속한 소형, 휴대화 추세에 맞춰 스텔링 냉동기의 주요한 활용영역인 적외선 진단시스템의 이동 및 휴대성에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 스텔링 냉동기는 몇 가지 주요 인자에 따라 성능이 크게 변화한다.

스털링 냉동기의 성능은 크게 저온부의 온도가 80K에 도달하는데 소요되는 냉각시간, 냉동능력, 입력전력으로 평가할 수 있다. 따라서 스텔링 냉동기의 충전압력 및 운전주파수(구동전압)는 입력전력 및 냉동능력에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 스텔링 냉동기의 성능에 크게 영향을 미치는 운전인자인 충전압력과 운전주파수(구동전압)에 대한 다양한 변화 실험을 통하여 그에 따른 운전특성 및 성능변화를 고찰하고 최적의 성능 조건을 찾아내고자 한다.

2. 본 론

Fig. 1은 본 연구에 사용된 일체형(integral type) 스텔링 냉동기의 기계구조를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 일체형 스텔링 냉동기는 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.

스털링 냉동기는 고압의 헬륨으로 충전되며, 압축기 피스톤과 팽창기의 변위기는 효율적인 극저온 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.

2.1. 실험 장치 및 방법

스털링 냉동기의 운전특성 및 성능을 구하기 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 토터리형 압축기의 운전주파수와 정현파 입력전류, 전압의 공급 및 조절을 위해 Agilent Technologies의 전원 공급장치(DC Power Supply, Model : E3634A)를 사용하였다.

스털링 냉동기를 항온·항습 챔버에 설치하여 냉동기 주위의 온도를 23 °C로 일정하게 유지하였으며, 주

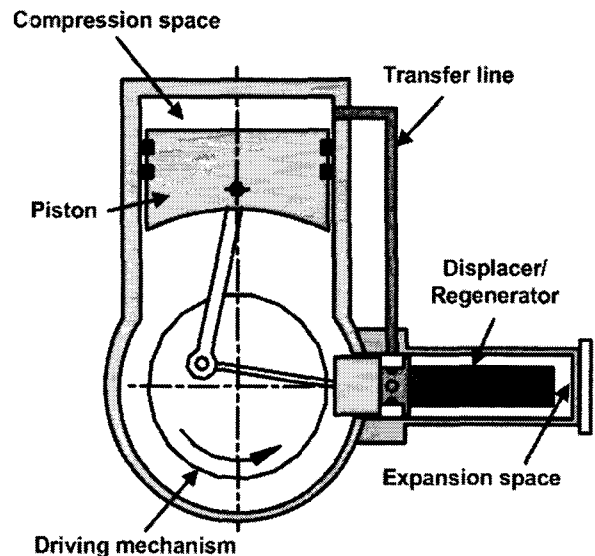


Fig. 1. Schematic diagram of Stirling refrigerator.

¹학생회원 : 전주대 대학원 기계공학과 석사과정
²정 회원 : 한국기계연구원 열유체공정기술연구부
³비 회원 : 전주대 공대 기계공학과 교수
*교신저자 : sjpark@mailgw.kimm.re.kr
원고접수 : 2008년 02월 05일
심사완료 : 2008년 03월 13일

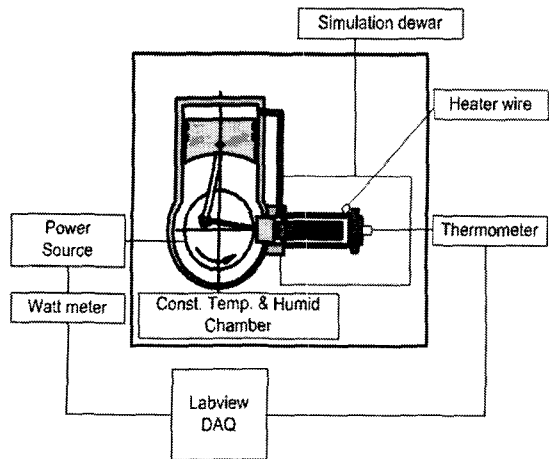


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

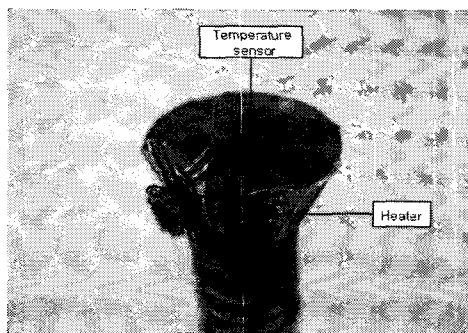


Fig. 3. Temperature sensor and heater wire on expander.

위로부터의 열침투를 차단하기 위해 팽창기의 저온부(cold end)를 진공용기(simulation Dewar)내에 설치하였다.

진공용기에 연결된 스테링 냉동기의 저온부에 온도를 측정하기 위해 Fig. 3에 나타난 바와같이 온도센서(silicon diode : DT-670, 측정온도범위 : 1.4 K ~ 500 K)를 부착하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 망가닌 히터선(Model : MW-36-100, R = 36.5 Ω/m @77 K)을 저온부에 일정한 저항만큼 감고 망가닌 선에 전류를 흘려 일정온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다.

이때 전원 장치로부터 공급되는 전류 및 전압, 전력을 동시에 Labview™ 프로그램을 이용하여 측정, 분석하였다.

스테링 냉동기의 성능을 평가하기 위해 입력전력을 20, 24, 28 VDC로 변화시키며 냉각시간 및 냉동능력을 측정하였고 또한 각각의 실험조건에서 충전압력을 20, 25, 30, 35, 40 bar로 변화시키며 냉각시간 및 냉동능력을 측정하였다. 스테링 냉동기의 작동유체로는 불순물의 유입으로 인한 성능저하를 억제하기 위해 고 순도의 헬륨 가스를 충분한 배기과정을 거친 후 충전하였다.

2.2. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 작동유체의 충전압력과 구동전압에 따른 스테링 냉동기의 냉각특성을 나타낸 그림으로 냉동기 주위 온도를 23 °C로 일정하게 유지하였다. 실험 결과

충전압력과 구동전압이 증가함에 따라 최저 도달온도가 낮아짐을 알 수 있고, 냉각속도가 증가함을 알 수

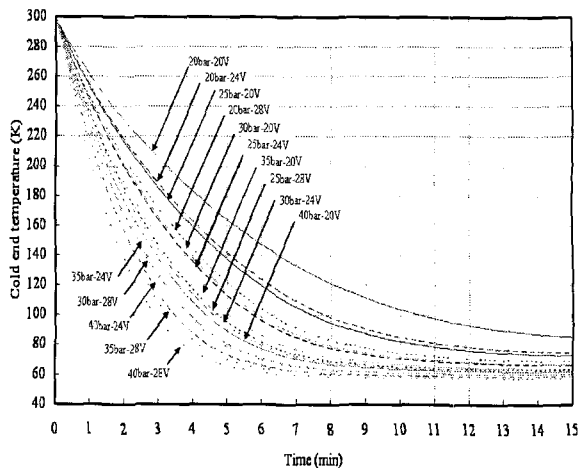


Fig. 4. Cooldown characteristics with varying charging pressure and input voltage.

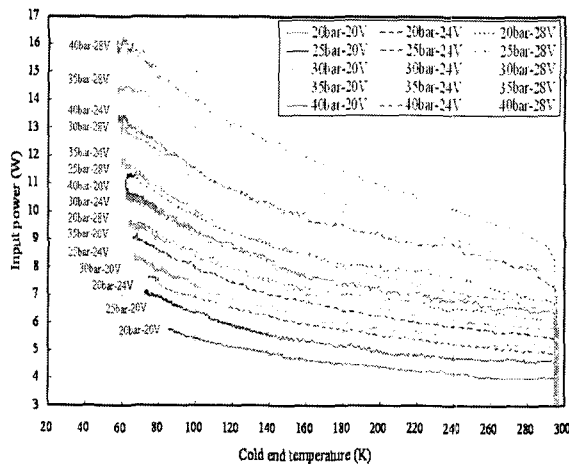


Fig. 5. Input power characteristics with varying charging pressure and input voltage.

있다. 충전압력 20 bar, 구동전압 20 VDC 조건에서 최저 도달온도는 84.1 K로 80 K에 도달하지 못하였고, 충전압력 40 bar, 구동전압 28 VDC 조건에서 최저 도달온도는 57.1 K, 80 K 도달 시간이 3분 40초로 현저하게 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 충전압력과 구동전압에 따른 스테링 냉동기의 입력전력 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 냉동기 저온부 온도가 강온됨에 따라 입력전력은 점점 증가하는 것을 알 수 있고, 충전압력과 구동전압이 증가함에 따라 입력전력이 증가하는 것을 알 수 있다. 충전압력 20 bar, 구동전압 20 VDC 조건에서 저온부 온도가 84.1 K에서 입력전력은 5.7 W 이고, 충전압력 40 bar, 구동전압 28 VDC 조건에서 저온부 온도가 80 K에서 입력전력은 15.0 W로 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 6은 충전압력과 구동전압에 따른 운전주파수 변화 특성을 나타낸 그림이다. 운전주파수는 운전초기에는 높은 운전주파수로 구동되나 강온과정이 진행되면서 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 이와 같은 냉동기의 운전특성은 냉동기 저온부 온도가 낮아지면서,

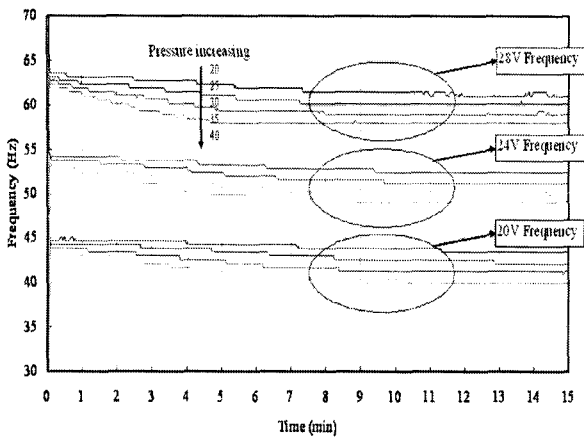


Fig. 6. Operating frequency characteristics with charging pressure and input voltage.

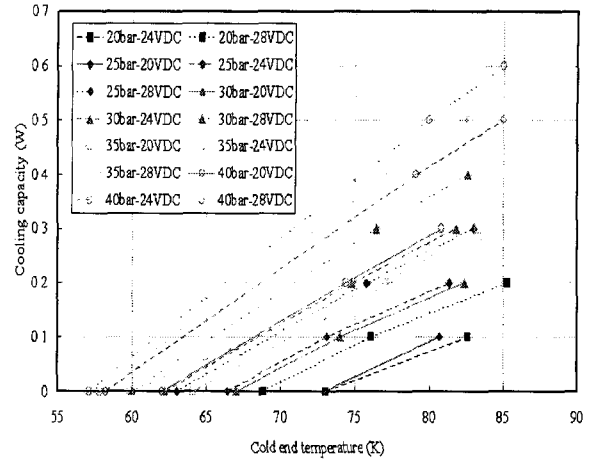


Fig. 8. Cooling capacity with charging pressure and input voltage.

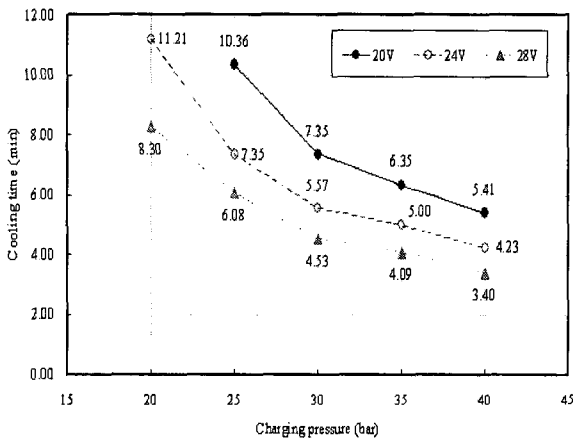


Fig. 7. Cooling time at 80K.

저온부의 팽창기와 변위기의 간극이 작아지고 이로 인한 마찰력이 증가한다. 뿐만 아니라 저온부 온도가 낮아지면서 시스템 내부의 압력진폭은 작아지나 압력의 위상 변화(저온부의 온도가 낮아지면서 압력과 압축기 피스톤 변위의 위상차가 커짐)로 인해 PV일은 증가하게 된다. 또한 저온부의 온도가 낮아지면서 저온부 가스의 밀도가 커지게 된다. 따라서 저온부의 헬륨가스의 질량이 커지게 되고 이로 인해 변위기의 운동이 시스템의 압력에 미치는 영향이 점차 커지게 되기 때문이다. 마찰력 및 PV일의 증가는 냉동기를 구동하는 모터의 토크를 증가시키고 이로 인해 모터의 회전수가 작아지면서, 모터의 운전특성의 변화가 발생하여 최종적으로 입력전력의 증가가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 충전압력과 구동전압의 변화에 따른 저온부 온도가 80 K에 도달하는데 걸리는 강은시간을 나타낸 그림이다. 충전압력과 구동전압이 증가할수록 저온부 온도가 80 K에 도달하는데 걸리는 시간이 빠른 것으로 나타났다. 낮은 충전압력에서 충전압력의 증가는 급격한 냉각시간의 감소를 유발하나, 30bar 이상에서는 그 차이가 작아짐을 알 수 있고, 구동전압 또한 증가율은 낮은 구동전압에서 급격한 냉각시간의 감소를 유발하나, 어느 시점 이상에서는 그 차이가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 냉각특성의 개선을 위해 시험

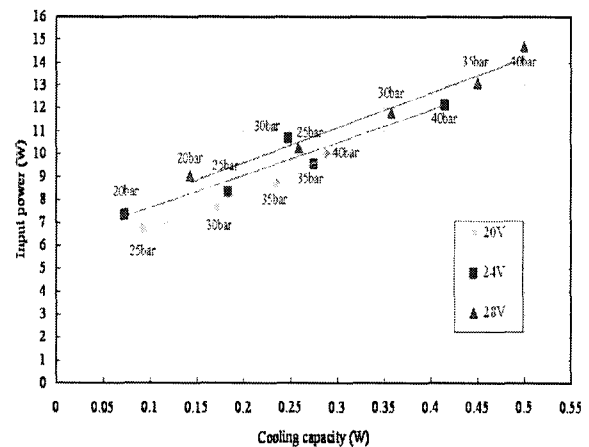


Fig. 9. Cooling capacity and input power at 80K.

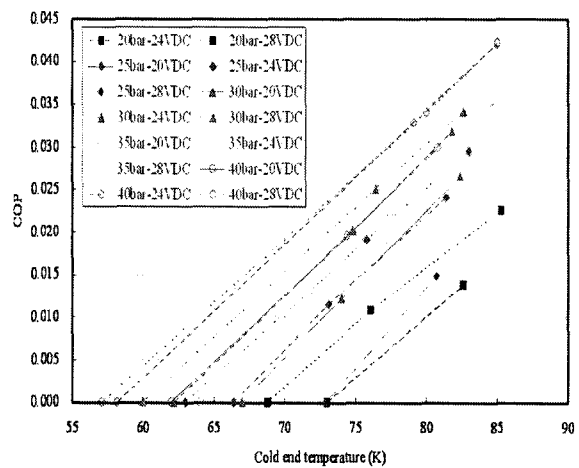


Fig. 10. COP with cold end temperature.

냉동기에 더 높은 충전압력 및 구동전압을 인가하는 것만으로는 냉동기 성능의 향상을 도모하기 어려운 것으로 판단된다.

Fig. 8은 충전압력과 구동전압에 따른 스테어링 냉동기의 저온부 온도 영역에서의 냉동능력을 나타낸 그림

이다. 그림에서 나타난 바와 같이 충전압력과 구동전압이 증가함에 따라 냉동능력 또한 증가함을 알 수 있다. 충전압력 25 bar, 구동전압 20 VDC 조건에서 저온부 온도가 80 K에서 냉동능력은 0.1 W 이고, 충전압력 40 bar, 구동전압 28 VDC 조건에서 저온부 온도가 80 K에서 냉동능력은 0.5 W로 5배 정도 차이가 나타났다.

Fig. 9는 스테링 냉동기의 저온부 온도가 80K에서 충전압력과 구동전압의 변화에 따른 냉동능력과 입력전력을 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 충전압력과 구동전압이 증가할수록 냉동능력과 입력전력이 증가하는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 충전압력과 구동전압에 따른 스테링 냉동기의 저온부 온도 영역에서의 COP를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 충전압력과 구동전압이 증가함에 따라 COP 또한 증가함을 알 수 있다. 하지만 저온부의 온도가 80 K에서 충전압력 35 bar, 구동전압 28 VDC 조건과 충전압력 40 bar, 구동전압 24 VDC조건, 충전압력 40 bar, 구동전압 28 VDC조건의 COP가 약 0.034로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이는 충전압력과 구동전압이 일정지점이상이 되면 COP는 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다.

3. 결 론

크랭크 구동형 스테링 냉동기의 성능에 크게 영향을 미치는 운전인자에 대해 다양한 변화의 실험을 통한 성능변화의 고찰을 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 충전압력과 운전주파수(구동전압)가 증가할수록 냉각속도가 빨라졌고, 입력전력은 증가하였으며, 냉동능력 또한 증가하였다.
- (2) 일정한 구동전압 인가 시 스테링 냉동기의 운전주파수는 초기의 운전주파수보다 감소하게 되고, 충전압력의 증가에 따라 운전주파수도 조금씩 감소하였다.
- (3) 충전압력과 운전주파수(구동전압)가 증가할수록 COP는 증가하다 일정지점이상일 때, COP는 더 이상 증가하지 않는다.

이러한 실험을 통한 성능변화 고찰의 결론을 토대로 스테링 냉동기의 성능향상 방법을 고찰한 결과 작동유체인 헬륨가스의 충전은 성능이 최대가 되는 압력점을 찾아 충전하고, 운전주파수를 모터의 최대 회전수에 맞춰 적당한 회전수로 구동시킨다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 민군겸용기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Graham Walker, "Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, 1989.

[2] Hiroyasu Ogiwara, "低温工学概論", 東京電機大學出版局, 1999.
 [3] Graham Walker, "Cryocoolers Part I,II", Plenum Press, New York and London, 1983.
 [4] 홍용주, 박성제, 김효봉, "초소형 일체형 스테링 극저온 냉동기의 열설계", 초전도저온공학회 학술대회논문집, pp. 225 - 228, 2004.
 [5] 홍용주, 박성제, 김효봉, 김양훈, 최영돈, "회전압축기형 스테링냉동기의 성능에 관한 실험적 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 1312 - 1316, 2004.

저 자 소 개



김대웅(金大雄)

1980년 09월 11일생, 2006년 전주대 공대 기계공학과 졸업, 현재 동대학원 공대 기계공학과 석사과정.



박성제(朴聖濟)

1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국 기계연구원 책임연구원.



홍용주(洪溶株)

1968년 03월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국 기계연구원 선임연구원.



김효봉(金孝峰)

1960년 04월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 2002년 충남대 공대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국 기계연구원 선임기술원.



고상철(高相喆)

1963년 10월 10일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 한국해양대 공대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1999년 동경대 공대 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 전주대 공대 기계공학과 교수.