

작동주파수에 따른 스티어링 극저온 냉동기의 특성에 관한 연구

박성제*, 홍용주*, 고득용*, 김효봉*, 오군섭*, 김종학**
 *한국기계연구원, ** (주)우영

Study of Stirling Cryocooler Performance with Different Operating Frequency

S.J. Park*, Y.J. Hong*, D.Y. Koh*, H.B. Kim*, K.S. Oh*, J.H. Kim**
 *Korea Institute of Machinery & Materials, **Wooyoung

sjpark@kimm.re.kr

Abstract - A Stirling cryocooler is relatively compact, reliable, commercially available, and uses helium as a working fluid. The FPFD Stirling cryocooler consists of two compressor pistons driven by linear motors which makes pressure waves and a pneumatically driven displacer piston with regenerator. It is the most suitable design for a mechanical cryocooler utilized in night vision environment. In order to get optimum operating frequency, natural frequency of piston and displacer, optimum phase angle between piston and displacer, cooling capacity, performance tests of the Stirling cryocooler by the frequency characteristics were performed.

1. 서 론

최근에 적외선 센서 및 고온 초전도체 등의 저온센서 냉각과 관련하여 액체질소온도(77K) 부근의 냉각장치 수요가 급증하고 있다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온 발생장치의 필요 조건은 (1)냉각온도, (2)냉동부하, (3)신뢰성, (4)진동레벨, (5)온도제어성, (6)Cooldown 시간 및 입력, (7)체적, 중량, (8)설치 환경 및 비용 등으로서 충분한 검토가 필요하다.

저온센서용 77K급 극저온 발생장치는 G-M 극저온 냉동기, 스티어링(Stirling) 극저온 냉동기, Joule-Thomson 극저온 냉동기 및 맥동관 극저온 냉동기 등으로 각 냉동기마다 장·단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 극저온 냉동기에 비해 저진동, 낮은 소요동력, 소형 경량, 충분한 내구성 등의 장점을 가지고 있는 선형압축기형(linear compressor type) 스티어링 극저온 냉동기를 개발하기에 앞서, 현재 국내 적외선 센서 냉각 수요의 대부분을 차지하고 있는 FPFD 스

터링 극저온 냉동기의 작동 조건, 작동 과정 및 성능 특성을 정확히 파악하기 위하여 작동주파수를 변화 시키며 무부하 실험과 부하 실험을 수행하고 이에 따른 특성 변화를 평가하고자 한다.

2. 본 론

Fig. 1은 FPFD 스티어링 냉동기의 개념도를 보여주고 있다. 스티어링 냉동기는 크게 압축부와 팽창부로 구분되어 있고, 압축부는 실린더, 피스톤, 코일과 마그넷 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 왕복기와 재생기, 왕복기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다.

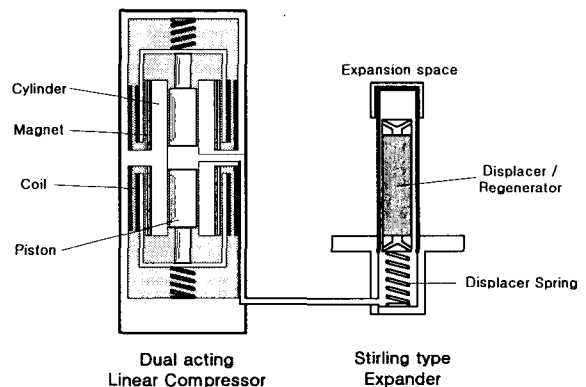


Fig. 1. Schematic diagram of the Stirling cryocooler

피스톤은 moving coil type으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되고, 이 피스톤은 가스압력을 발생하여 스프링으로 연결된 왕복기를 작동한다. 가스 스프링은 왕복기와 피스톤에 의한 작동과정이 이상적인 사이클에 가깝도록 조절한다. 냉동은 팽창공간에 연결된 cold end 부근에서 발생하고, 왕복기는 피스톤 사이의 공간, split tube내 공간과 왕복기의 고온부 공간으로

구성된 압축공간으로부터 팽창공간 사이에 가스 유동을 발생시킨다.

2.1 실험장치 및 실험방법

Fig. 2는 스테링 냉동기 성능시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 이 실험에 사용된 진공용기는 길이 160mm, 내경 80mm, 두께 5mm의 스테인레스강이었다. 진공플랜지에 연결된 스테링 냉동기는 저온부에 온도센서와 열선(heater wire)을 부착하고, 진공용기 외벽으로부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super-insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 스테링 냉동기와 조립된 진공용기는 로타리 진공펌프를 사용하여 약 10^{-2} Torr의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다.

스테링 냉동기 저온부의 온도는 silicon-diode 센서를 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 9.5Ω의 망가닌 열선을 저온부에 감고 전류를 흘려 일정 온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다. 또한 압축기 셀, 연결관, 왕복기 고온부와 대기에 열전대 T type을 부착하여 온도변화를 측정하였다.

또한 작동주파수와 입력전류, 전압의 조절은 Fujitz사의 AC power supply를 사용하였으며, 실험에 사용된 스테링 냉동기의 코일에는 입력전류 및 전압에 각각 4A, 10.2V의 한계가 있기 때문에 그 이상 넘지 않도록 조절 하였다.

스테링 냉동기의 성능시험은 선형압축기의 전압과 작동주파수를 변경할 때의 최저도달온도를 측정하고, 각 주파수에서의 냉동능력을 측정함으로써 무부하 실험과 부하 실험을 병행하였다.

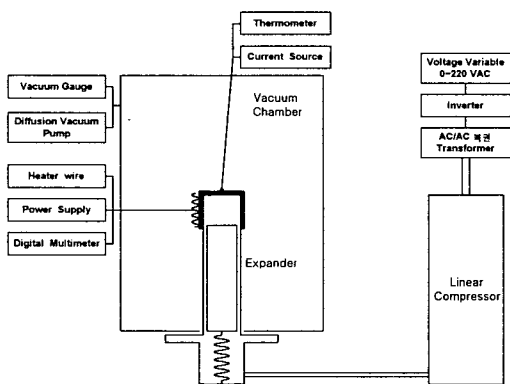


Fig. 2. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

2.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 무부하 조건에서 작동주파수에 따른 스테링 냉동기 cold end에서의 cool down 특성을 비교한 그림이다. 작동주파수 50Hz에서 가장 빨리 저온으로 안정되고, 작동주파수 55Hz,

45Hz, 60Hz 40Hz, 65Hz 순으로 저온으로 안정되는 시간이 많이 걸린다는 것을 알 수 있다. 특히 작동주파수 65Hz에서는 최저온도가 약 256K로써 거의 냉동이 발생하지 않았다. 따라서 스테링 극저온 냉동기의 작동주파수에 따라 cool down 특성이 많이 변하기 때문에 작동주파수가 매우 중요한 운전 변수라는 것을 알 수 있다. 또한 작동주파수 65.45Hz에서는 cold end부의 온도가 변화가 없어 냉동이 발생하지 않는 작동주파수이며, 이 때의 작동주파수는 왕복기의 고유진동수임을 알 수 있다.

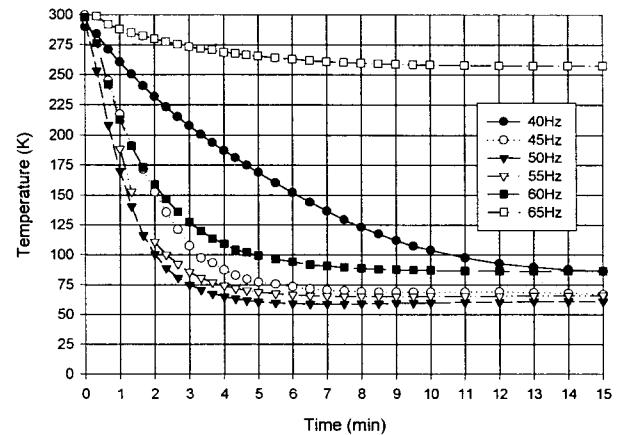


Fig. 3. Cool down performance at no load condition

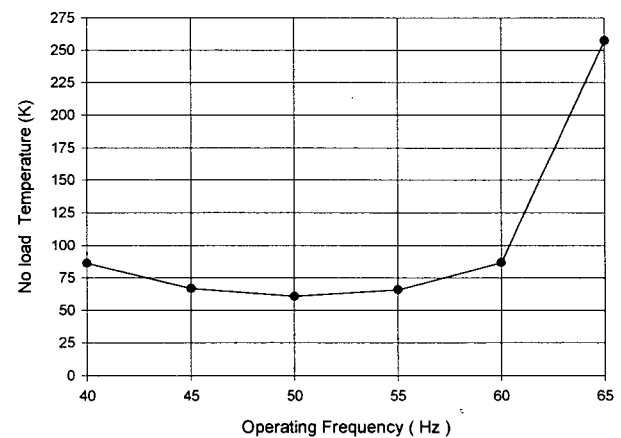


Fig. 4. No load temperature

Fig. 4는 작동주파수에 따른 cold end에서의 최저온도를 나타내고 있다. 50Hz에서 61K로서 가장 낮아 최적 작동주파수임을 알 수 있으며, 작동주파수 40Hz, 45Hz, 55Hz, 60Hz, 65Hz에서 최저온도는 각각 86.3K, 67K, 66K, 86.7K, 257.5K 이었다.

Fig. 5는 작동주파수에 따라 시스템에 입력되는 전류와 전압에 의한 저항의 변화를 나타낸다. R이 최대인 작동주파수에서 전류와 P_{loss} 가 최소가 되며, 이 때의 작동주파수는 압축기 피스톤이 공진이 되는 고유진동수라 할 수 있다.

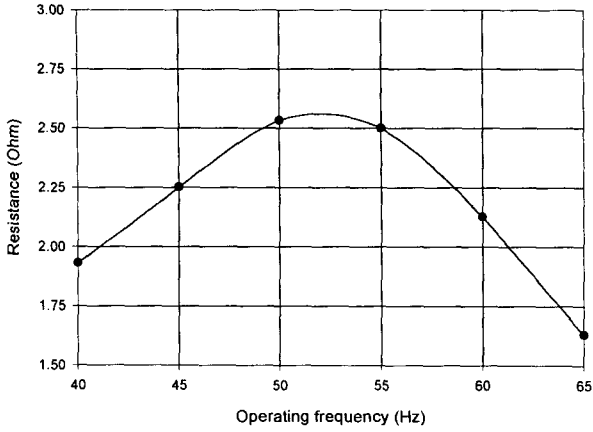


Fig. 5. cryocooler system resistance

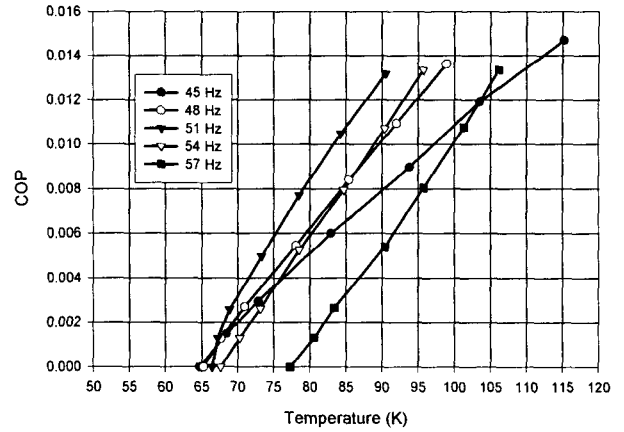


Fig. 7. COP

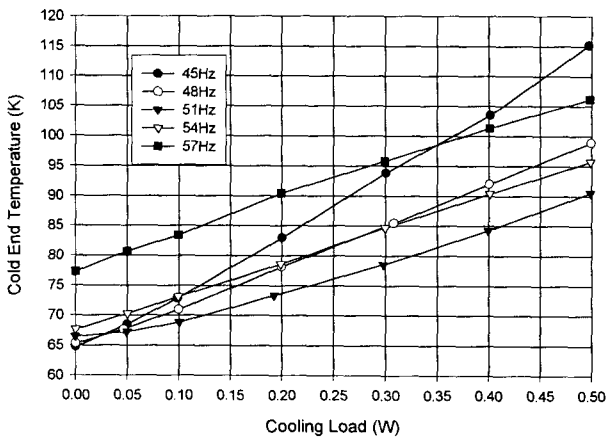


Fig. 6. Cooling load

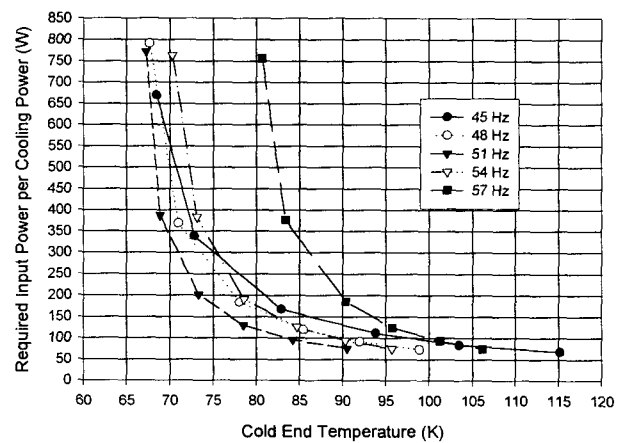


Fig. 8. Required input power characteristics

Fig. 6은 작동주파수에 따른 cooling load의 변화를 나타내고 있다. 측정된 작동주파수는 45Hz, 48Hz, 51Hz, 54Hz, 57Hz이며, 작동주파수 51Hz에서 가장 높은 냉동능력을 보여주었다. 그리고 51Hz 보다 낮은 주파수에서의 냉동능력증가율보다 51Hz 보다 높은 주파수에서의 냉동능력의 증가율이 높음을 알 수 있었다. 이는 작동주파수가 증가함에 따라 시간당 사이클 횟수가 증가하여 냉동능력의 증가율이 높아지기 때문이다. 작동주파수 51Hz일 때 77K에서의 냉동능력은 약 0.3W이었다.

Fig. 7은 작동주파수를 변화 시킬 때 온도에 따라 측정된 입력과 냉동능력에 의해 계산된 COP의 변화를 보여주고 있다. COP도 냉동능력과 마찬가지로 51Hz에서 가장 높게 나타났으며, 51Hz 보다 낮은 주파수보다 높은 주파수에서 COP의 증가율이 높았다.

Fig. 8은 Cold end 부에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력을 온도에 따라 각 작동주파수에서 나타내고 있다. Cold end 부에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력은 온도가 증가함에 따라 감소하였으며 51Hz에서 가장 낮았다.

Cold end 부 온도 80 K에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력이 최저인 작동주파수는 51Hz이었으며, 그 때 입력은 약 120W로 나타났다.

Fig. 9는 cold end부를 80K, 90K, 100K로 일정하게 하였을 때, 작동주파수에 따른 냉동능력의 변화를 보여주고 있다. Cold end부의 온도가 각각 100K, 90K, 80K 일 때 최대 냉동능력을 보여주는 작동주파수는 각각 51.914Hz, 50.78Hz, 49.80Hz로 조금씩 낮아지고 있다는 것을 알 수 있는데, 그 주파수에서 압축기의 피스톤과 팽창부의 왕복기 사이의 위상차가 45°이기 때문이라는 것을 알 수 있다.

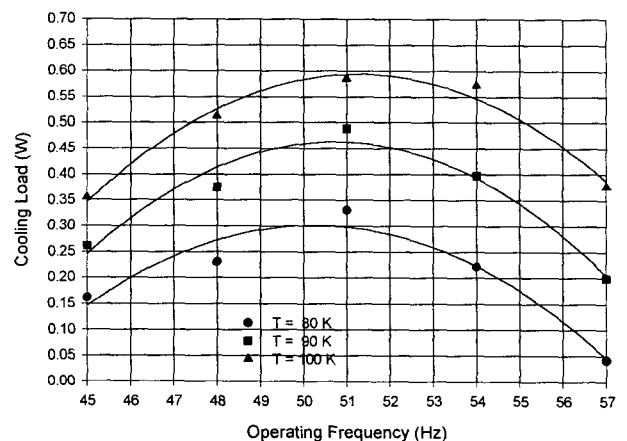


Fig. 9. Cooling power characteristics

3. 결 론

스터링 극저온 냉동기의 독자모델을 설계, 제작 하기에 앞서 FPDF 스텔링 극저온 냉동기의 작동 조건과 작동 과정 및 성능 특성을 정확히 파악하기 위하여 작동주파수를 변화 시키며 무부하 실험과 부하 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 스텔링 극저온 냉동기는 작동주파수에 따라 최저온도가 많이 변하기 때문에 작동주파수가 매우 중요한 변수라는 것을 알 수 있었다.
- (2) 작동주파수 65.45Hz 에서는 cold end부의 온도가 변화가 없어 냉동이 발생하지 않는 작동주파수이며, 이 때의 작동주파수는 왕복기의 고유진동수임을 알 수 있었다.
- (3) 스텔링 극저온 냉동기 시스템의 저항이 최대인 작동주파수에서 전류와 P_{loss} 가 최소가 되며, 이 때의 작동주파수는 압축기 피스톤이 공진이 되는 고유진동수라는 것을 알 수 있었다.
- (4) 최적 작동주파수 51Hz 보다 낮은 주파수에서의 냉동능력증가율과 COP의 증가율보다 51Hz 보다 높은 주파수에서의 냉동능력의 증가율과 COP 증가율이 높음을 알 수 있었다.
- (5) 최대 냉동능력을 보여주는 작동주파수에서 압축기의 피스톤과 팽창부의 왕복기 사이의 위상차가 45° 라는 것을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Cardin, D. Feger, and D. Verbeek, "Space Qualification Program of a Signaal USFA Tactical Cooler for the Mars 1996 Apace Mission", Cryocoolers 8, p.137, 1995.
- [2] R.M. Rawlings, C.E. Granger III, and G.W. Hinrichs, "Linear Drive Stirling Cryocoolers: Qualification and Life Testing Results", Cryocoolers 8, p.121, 1995.
- [3] R.E. McMurray, Jr., "Infrared Detector Requirements which drive Cryogenic Development", Cryogenics 1994, Vol. 34, No. 5, 1994.
- [4] R. Narayan, "Dual Opposed Piston Stirling Cryocoolers for IR Systems", Cryocoolers 8, p.129, 1995.
- [5] 박성제의 3인, "저온센서 냉각용 맥동관 냉동기의 평가", 공기조화 냉동공학회 '98동계학술대회 논문집, p.84, 1998
- [6] 박성제, 고득용, "적외선 소자 냉각용 극저온 냉동 장치", 한국기계연구원 기계와 재료, 제 10권, 제 2호, p.92, 1998
- [7] 고득용의 4인, "적외선 센서 냉각용 스텔링 냉동기의 성능시험", '99 한국초전도, 저온 공학회 학술대회 논문집, p.202.8, 1999

[8] Y.J.Hong, etc., "A simple analysis of split-type free piston, free displacer Striling Cryocooler", Korea-Japan Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2000.

[9] S.J.Park, etc., " An experimental study of split-type free piston, free displacer Striling Cryocooler", Korea-Japan Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2000.