

스터링 극저온 냉동기의 운전주파수 의존성에 관한 연구

홍용준*, 박성제*, 고득용*, 김효봉*, 김양훈*, 김종학**
*한국기계연구원, ** (주)우영

Study of the Dependency on Operating Frequency of the Stirling Cryocooler

Yong-Ju Hong*, Seong-Je Park*, Deuk-Yong Koh*, Hyo-Bong Kim*,
Yang-Hoon Kim*, Jong-Hak Kim**
*Korea Institute of Machinery & Materials, **WooYoung

yjhong@kimm.re.kr

Abstract - A free piston and free displacer (FPFD) Stirling cryocooler for the cooling infrared and cryo-sensor is currently under development at Korea Institute of Machinery & Materials.

In this study, the dynamic characteristics of the displacer in the expansion space of the Stirling cooler was investigated by experiment.

The experimental results show that the Stirling cryocooler has maximum cooling capacity at the certain relation between operating frequency and natural frequency of the displacer, and the operating frequency of the Stirling cryocooler should be determined by natural frequency of the linear compressor and displacer.

1. 서 론

최근에 적외선 센서 및 고온 초전도체 등의 저온센서 냉각과 관련하여 액체질소 온도(77K) 부근의 냉각장치 수요가 급증하고 있다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온 발생장치는 (1) 냉각온도, (2) 냉동부하, (3) 신뢰성, (4) 진동 레벨, (5) 온도제어성, (6) Cooldown 시간 및 입력, (7) 체적, 중량, (8) 설치 환경 및 비용 등의 관점에서 충분한 검토가 필요하다.[1]

저온센서용 냉각온도 77K급 극저온 발생장치로는 G-M 극저온 냉동기, 스텐링(Stirling) 극저온 냉동기, Joule-Thomson 극저온 냉동기 및 맥동관 극저온 냉동기 등이 있으며, 각 냉동기마다 장·단점이 있다.

본 연구에서는 기존의 극저온 냉동기에 비해 저진동, 낮은 소요동력, 소형 및 경량, 충분한 내구성 등의 장점을 가지고 있는 선형압축기(linear compressor) 구동 스텐링 극저온 냉동

기를 개발하기에 앞서, 현재 국내 적외선 센서 냉각 수요의 대부분을 차지하고 있는 FPFD 스텐링 극저온 냉동기의 작동 조건, 작동 과정 및 성능 특성을 정확히 파악하기 위한 연구[2,3,4]의 일환으로, 스텐링 냉동기의 변위기의 동특성 인자 변화에 의한 냉동특성 변화를 평가하고자 한다.

2. 본 론

FPFD 스텐링 냉동기의 개념도는 Fig. 1과 같다. FPFD 스텐링 냉동기는 크게 선형 압축기 즉 압축부와 팽창부로 구분되어 있으며, 압축부는 실린더, 서로 반대 방향으로 구동되는 두 개의 피스톤, 코일과 자석 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 변위기와 그 내부의 재생기, 변위기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다.

피스톤은 코일구동방식(moving coil type) 또는 자석 구동 방식(moving magnet type)으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되고, 이 피스톤의 구동에 의해 발생된 압력파형은 연결관(split tube)을 통해 연결된 팽창기내의 변위기 및 팽창부로 전파된다.

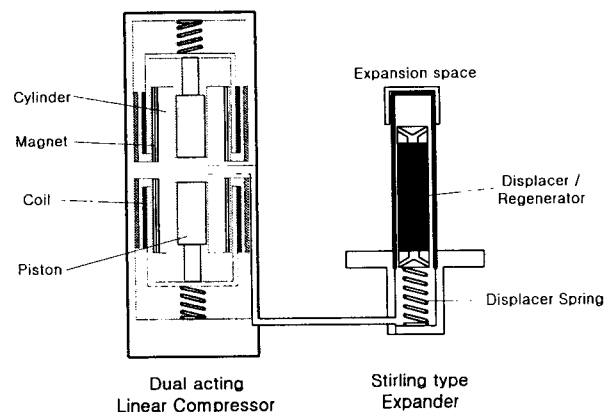


Fig. 1. A FPFD type stirling cryocooler

한편 냉동은 팽창공간에 연결된 저온부에서 발생하고, 변위기는 피스톤 사이의 공간, split tube내 공간과 팽창기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간과 팽창기의 저온부 공간의 압력차에 의해 구동된다. 이와 같은 변위기의 동특성은 변위기의 질량(m_d), 마찰계수(c_d), 스프링상수(k_d) 및 재생기를 통과하는 작동유체의 압력강하로 인한 구동력($\sum_i \Delta P_i \cdot A_i$)에 의해 결정되며, 이를 식으로 나타내면 식(1)과 같다.

$$m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = \sum_i \Delta P_i \cdot A_i \quad (1)$$

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (2)$$

$$\zeta = c_d / \sqrt{4mk} \quad (3)$$

Fig. 2 및 Fig. 3은 식(1)의 해를 운전주파수의 변화에 대해 도시한 그림으로, Fig. 2에서 고유주파수 부근의 운전주파수영역에서 최대의 변위가 발생함을 알 수 있으며, Fig. 3에서 이 영역에서 구동력과 위상차는 90도가 됨을 알 수 있다. 또한 마찰계수의 크기가 변위기의 변위뿐만 아니라 위상에도 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 한편 스텔링 냉동기의 냉동의 발생은 이상적인 냉동능력을 나타내는 식(4)에서 알 수 있는 바와 같이, 팽창부의 압력변화와 변위의 상관관계에 의해 결정된다.

$$Q_{ideal} = \pi f P_o A_e x_d \sin \psi \quad (4)$$

따라서 스텔링 냉동기에서 최대의 냉동능력을 얻기 위해서는 복사열손실, 전도열손실 등의 팽창부 열손실의 최소화 뿐만 아니라, 변위기 변위의 최대화와 팽창공간의 압력과 변위기 변위사이의 위상차의 최적화가 요구됨을 알 수 있으며, 최적의 냉동능력을 발휘 할 수 있는 스텔링 냉동기를 설계하기 위해서는 변위기의 동특성 파악이 필수적이다.

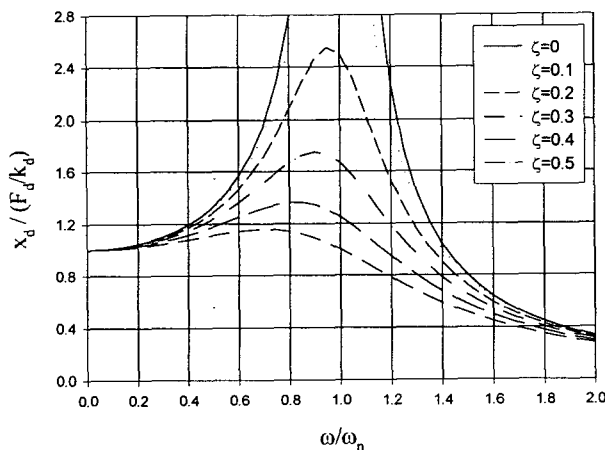


Fig. 2. Force ratio vs. frequency ratio

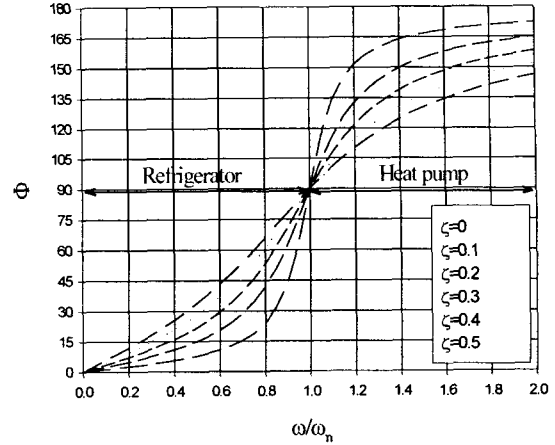


Fig. 3. Phase angle vs. frequency ratio

2.1 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 스텔링 냉동기는 FPPD형이며, 선형 압축기 크기는 $\Phi 55\text{mm} \times 120\text{mm}$ (length) 이고, 팽창기 실린더 크기는 $\Phi 7\text{mm} \times 70\text{mm}$ (length)이다.[5,6]

Fig. 4는 스텔링 냉동기 및 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 상온의 주위로부터 열침투를 차단하기 위해 팽창기의 cold end를 진공용기(dewar)내에 설치하였으며, 실험에 사용된 진공용기는 길이 160mm, 내경 80mm, 두께 5mm의 스테인레스강으로 제작하였다. 진공플랜지에 연결된 스텔링 냉동기는 저온부에 온도측정을 위한 silicon-diode 온도센서와 온도조절 및 냉동능력을 측정하기 위한 열선(heater wire)을 부착하고, 진공용기 외벽으로부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super-insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 설치하였다. 스텔링 냉동기와 조립된 진공용기는 터보분자 진공펌프를 사용하여 약 10^{-5}Torr 의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다. 또한 압축기 셀, 연결관, 왕복기 고온부와 대기에 열전대 T type을 부착하여 운전 중 온도변화를 측정하였다.

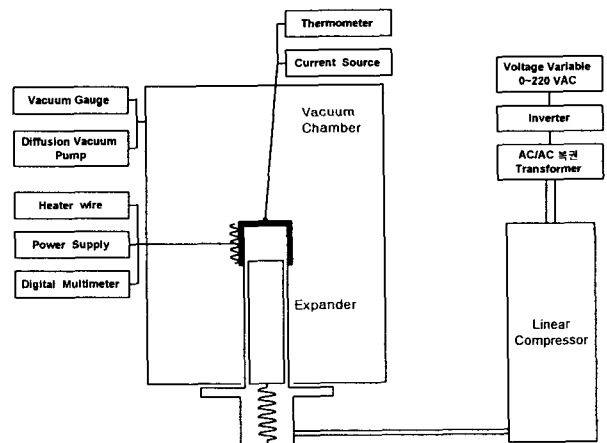


Fig. 4. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

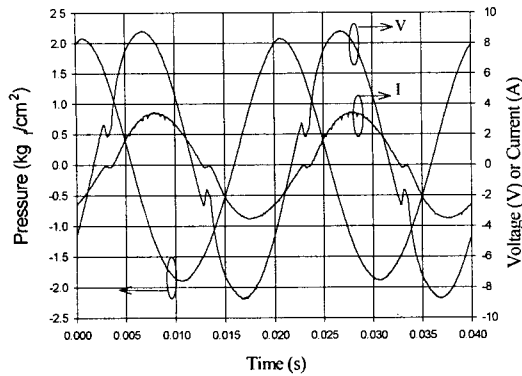


Fig. 5. Typical wave form of voltage, current and pressure in the Stirling cryocooler

한편 선형압축기 작동주파수와 입력전류, 전압의 조절은 Fujitsu사의 AC power supply를 사용하였다. 측정된 결과들은 Labview 데이터 처리 프로그램을 이용하여 수집하였다. 실험은 운전주파수의 변화에 따른 선형압축기의 특성변화에 의한 영향을 배제하기 위해 팽창기로 공급되는 압력 파형이 일정하게 유지되도록 선형압축기의 입력전압을 조절하며, 변위기의 마찰력으로 인한 특성변화를 억제하기 위해 일정한 cold end부 온도(150K)에서 냉동능력을 측정하였다. Fig. 5는 이와 같은 냉동기 운전조건에서 구한 선형압축기 입력전압 및 전류 파형과 팽창공간의 압력 파형이다.

2.2 실험결과 및 고찰

FPFD형 스텔링 냉동기는 선형압축기의 운전주파수에 따라 저온부의 최저도달온도가 크게 영향을 받으며, 냉동능력, 입력전력 등의 작동 특성에 큰 변화가 발생하는 특징을 가지고 있으며, 최적의 운전주파수는 피스톤 및 왕복기의 코일스프링 및 가스스프링에 의해 결정되는 스텔링 냉동기의 고유진동수($\omega_n = \sqrt{(k_{spring} + k_{gas})/m}$) 즉 선형압축기의 고유진동수 및 왕복기의 고유진동수에 의해 결정된다.[7,8]

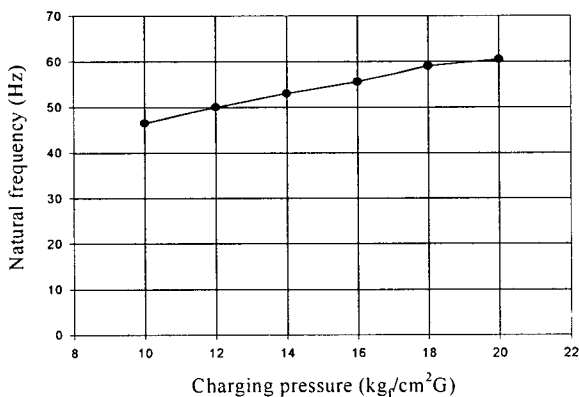


Fig. 6. The natural frequency of the linear compressor

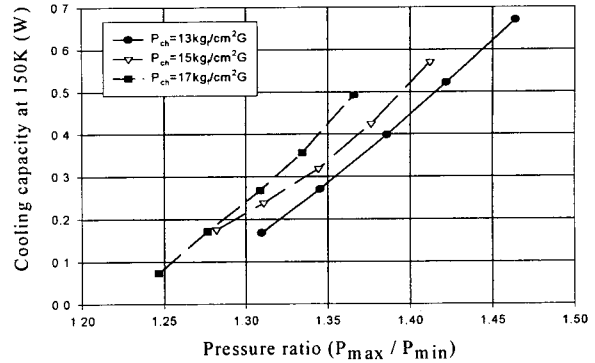


Fig. 7. The cooling capacity with different pressure ratio at given operating frequency

Fig. 6은 충전압력 변화에 따른 선형압축기의 고유진동수를 나타낸 그림으로, 충전압력이 증가함에 따라 압축공간 내의 가스스프링 역할 증대됨으로 인하여 선형압축기의 고유진동수가 증가됨을 알 수 있다. 또한 약 12 kg/cm²G의 충전압력에서 고유진동수가 50Hz 부근으로 나타나, 이 영역이 최적의 선형압축기 운전 조건이 됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 일정한 선형압축기 운전주파수(50Hz)에서 저온부의 온도가 150K로 동일한 조건에서, 팽창공간에서 발생하는 한 주기 중에 발생하는 고압과 저압의 차이의 비 변화에 따른 냉동능력 변화를 나타낸 그림이다. 충전압력에 관계없이 압력비가 증가할 수록 즉 입력전력이 증가할 수록 냉동능력은 선형적인 증가를 나타내며, 충전압력이 작은 경우 더 큰 압축비를 생성하였으나, 동일한 압축비에서는 충전압력이 증가되면 냉동능력이 증가하였다.

Fig. 8은 팽창기로 공급되는 압력 파형의 고압과 저압의 차이가 4 kg/cm²로 일정할 때 저온부 온도 150K에서 측정한 냉동능력으로, 충전압력의 변화시 및 운전주파수의 변화에 대해서도 시하였다. 실험결과는 충전압력이 변화에도 47.5 ~ 50Hz의 운전주파수 영역에서 최대의 냉동능력을 나타내고 있음을 알 수 있다.

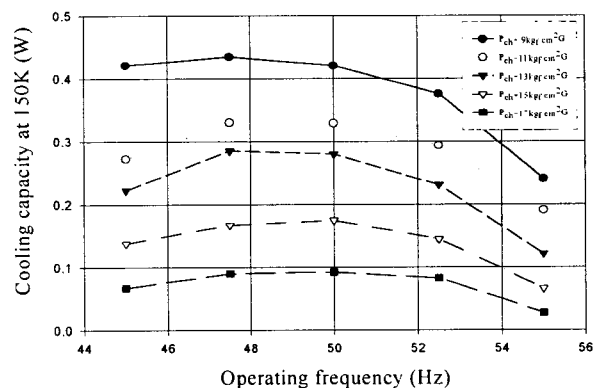


Fig. 8. The cooling capacity with different operating frequency

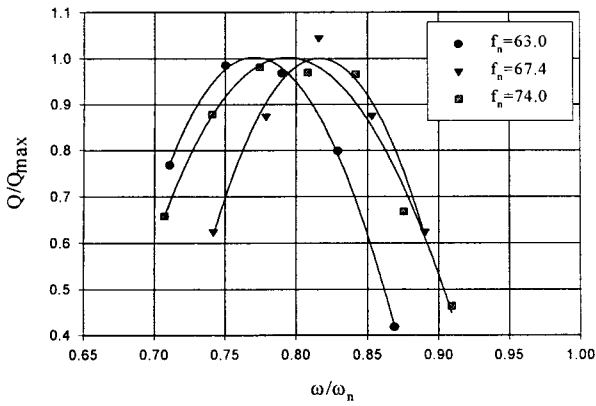


Fig. 9. The cooling capacity characteristics with natural frequency of the displacer

또한 50Hz 이상의 운전주파수 영역에서는 급격한 냉동능력의 감소가 발생하였다. 냉동능력이 일정한 운전주파수 영역에서 최대가 됨은 선형압축기의 영향을 배제한 변위기의 동특성이 일정한 운전주파수 영역에서 최적화됨을 의미하는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 Fig. 2 및 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 운전주파수가 변위기의 고유주파수에 근접해 가면 변위기의 변위는 증가하나 위상이 최적의 위상으로부터 벗어나기 때문으로 판단된다. 한편 스테링 냉동기 충전압력이 증가할수록 동일한 운전주파수에서 냉동능력이 감소하였다. 이와 같은 충전압력에 대한 냉동능력변화는 Fig. 7의 압축비 감소의 경우와 잘 일치한다.

Fig. 9는 Fig. 8에서 나타난 최대 냉동능력시의 운전주파수와 변위기의 고유진동수의 관계를 규명하기 위해, 변위기의 코일스프링 강성을 변화시켜 구한 냉동능력 특성이다. 이때 실험은 동일한 변위기를 사용하였으며, 팽창부의 체적변화로 인한 변화를 억제하기 위해 동일한 자유높이를 가지는 코일스프링을 사용하여 고유주파수가 각각 63.0, 67.4, 74.0Hz의 세 경우에 대해 실험을 수행하였다. 실험결과 다소의 편차는 발생하였으나 주파수비 약 0.8 부근에서 최대의 냉동능력이 발생하였다. 따라서 변위기 고유주파수가 약 60 ~ 64Hz인 경우, 선형압축기의 운전주파수가 50Hz일 때 최대의 냉동능력을 나타낼 수 있을 것으로 예측된다.

3. 결 론

FPFD 스테링 냉동기의 변위기의 동특성이 냉동능력에 미치는 영향을 규명하기 위해 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 일정한 운전주파수에서 동일한 압축비인 경우 충전압력이 증가되면 냉동기의 냉동능력이 증가한다.

(2) 일정 운전주파수 영역에서 최대냉동능력이 발생하였고, 변위기의 동특성이 최적화됨을 의미하는 것으로 판단된다.

(3) 운전주파수와 변위기 고유주파수의 주파수비가 약 0.8 부근에서 최대의 냉동능력이 발생한다.

(4) 큰 냉동능력을 위해서는 운전주파수 선정시 선형압축기의 고유주파수 뿐만 아니라 변위기의 고유주파수를 고려하여야 한다.

(5) FPFDD형 스테링 냉동기의 정확한 변위기 동특성 및 냉동특성의 파악을 위해서는 변위기 변위의 측정이 요구된다.

본 연구는 1999년도 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박성제 외, "Linear Compressor 스테링 냉동기 설계에 관한 연구", 2000년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 81-84, 2000
- [2] 고득용 외, "센서 냉각용 소형 스테링 냉동기 개발 동향", 초전도와 저온공학, 제2권 제2호 pp.11-18, 2000
- [3] 김효봉 외, "작동주파수와 연결관 길이 변화가 스테링 냉동기의 성능에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 55-61, 2001
- [4] 박성제 외, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스테링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 62-68, 2001
- [5] 박성제 외, "선형압축기형 스테링 극저온 냉동기의 설계, 제작에 관한 연구", 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, pp. 234 - 238, 2001
- [6] 박성제 외, "스테링 극저온 냉동기의 성능향상에 관한 연구", 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집, pp. 89-93, 2001
- [7] 홍용주, 박성제, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "스테링냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001
- [8] A.K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical Society, pp.1136-1141, 1979