

스터링 냉동기의 압력특성에 관한 실험적 연구

홍용주* · 박성제* · 김효봉* · 고득용*

Experimental Study of the pressure characteristics in the Stirling refrigerator

Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, and Deuk-Yong Koh

Key Words: Stirling refrigerator(스터링냉동기), Pressure wave(압력파형), Linear compressor(선형 압축기), Regenerator(재생기), Pressure drop(압력강하)

Abstract

The linear compressor have been widely used for pressure wave generation in the Stirling cryocooler and Stirling type pulse tube cryocooler for tactical purpose. The linear compressor has small and compact structure, and long life due to having non-contact sealing mechanism. and the pressure drop through regenerator was ver important role in the motion of displacer in the expander of the Stirling cryocooler.

In this study, the characteristic of the linear compressor and the pressure drop through regenerator in the expander was experimentally investigated. The results show the resonance of the compressor is very important to get maximum performace. and the gas spring force in the compression space of the compressor has effect on the characteristic of reonance. and the results show the pressure drop through regenerator is very small than operating pressure change.

1. 서 론

기호설명

- A : 면적 [m²]
- B : 자속밀도 [T]
- c : 감쇄계수 [Ns/m]
- I : 전류 [A]
- k : 스프링 상수 [N/m]
- l : 코일길이 [m]
- L : 인덕턴스 [H]
- m : 질량 [Kg]
- P : 압력 [Pa]
- R : 전기저항 [Ω]
- t : 시간 [s]
- V : 전압 [V]
- x : 변위 [m]

최근 군수용 및 민수용 적외선센서 및 초전도 필터 등의 적절한 냉각을 위해 온도영역 : 30 ~ 100 K, 냉각능력 : 1 ~ 10 W급의 극저온 냉동기의 개발 및 응용이 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾

선형압축기를 구동원으로 하는 소형 스텐링 냉동기 및 스텐링형 맥동관냉동기는 소형화 및 저소음화가 가능한 장점을 지니고 있고, 압축 피스톤이 무운환의 비접촉기구를 사용하기 때문에 장수명이 가능한 장점을 지니고 있어 민수용 및 군수용으로 적합한 냉동기로 평가받고 있다.

선형압축기는 구동부의 방식에 따라 이동코일(moving coil)형과 이동자석(moving magnet)형 등으로 분류되며, 선형압축기 실린더 내 피스톤의 왕복운동을 통해 압축공간에서 압력 파형을 생성하여 연결관(split tube)을 통해 냉각기로 압력 파형을 공급한다.

선형압축기에서 생성된 압력 파형의 크기는 극

* 한국기계연구원 열유체환경연구부
Email : yjhong@kimm.re.kr
TEL:(042)868-7366 FAX:(042)868-7335

저온 냉동기의 성능을 결정하는 주요한 인자로 작용하며, 특히 선형 압축기는 스테링 냉동기 및 스테링형 맥동관 냉동기의 내구성 및 신뢰성을 결정하는 주요한 인자이다.

스테링 극저온 냉동기의 팽창부에서는 왕복기의 운동에 의해 냉각이 발생한다. 왕복기의 운동은 재생기를 통과하는 작동유체의 압력강하에 의해 생성되고, 따라서 재생기를 통과하는 작동유체의 압력강하는 스테링 극저온 냉동기의 냉각특성에 큰 영향을 미치는 인자이다.

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 압축기 진동을 감쇄하기 위해 이동코일(moving coil) 방식의 두 개의 피스톤이 서로 반대 방향으로 왕복운동을 하는 선형압축기, 연결관, 재생기(regenerator)를 내장한 왕복기(displacer), 팽창기(expander)로 구성되는 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 소형 1W급 냉각능력의 FPF(Free Piston, Free Displacer) 방식 스테링 냉동기용으로 설계, 제작되어진 선형 압축기 및 재생기의 압력특성을 실험적으로 고찰하였다.

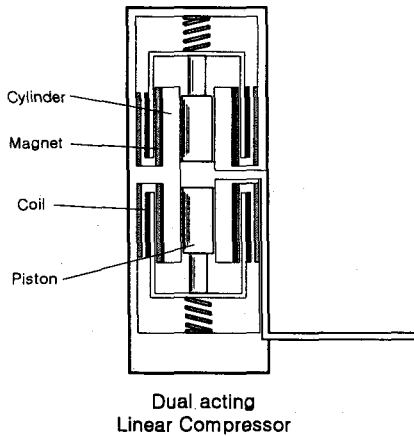


Fig. 1 The linear compressor

2. 스테링 냉동기 운전 특성

선형 압축기의 운전 특성은 식(1)의 질량-스프링-감쇄 시스템으로 표현되는 피스톤의 힘 평형 방정식과 식(2)의 인가 전압방정식으로 나타낼 수 있다.

피스톤에 부과되는 힘은 피스톤의 왕복운동으

로 인한 관성력과 피스톤과 실린더사이의 마찰로 인한 감쇄력(damping force), 기계스프링에 의한 힘, 실린더 내 압축공간과 버퍼(buffer) 공간 작동유체의 압축 및 팽창 압력의 차이로 인해 유발되는 힘, 그리고 인가되는 전류로 인해 발생하는 전자기력이 있다.

$$m_c \ddot{x}_p + c_c \dot{x}_p + k_c x_p + \Delta P \cdot A_c = F_o \sin \omega t \quad (1)$$

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + BI \frac{dx_p}{dt} \quad (2)$$

이때 인가되는 전류 및 피스톤의 왕복운동 즉 행정거리 및 발생되는 압력 파형 사이에는 위상차 즉 시간지연이 발생하며, 이를 정현파로 나타내면 피스톤의 행정거리, 압력파형, 전류는 각각 식(3), (4), (5)와 같다.

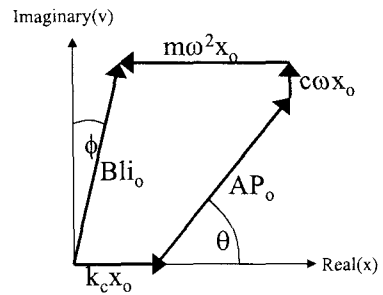


Fig. 2 Force diagram

$$x = x_o \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$P = P_o \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$$I = I_o \sin(\omega t + \Psi) \quad (5)$$

식(3), (4), (5)를 식(1)에 대입하여 정리하면, Fig. 2와 같은 그림을 얻을 수 있다. 주어진 행정거리에서 선형압축기에 공급되는 전자기력을 최소화하기 위해서는 행정거리와 전자기력, 즉 전류의 위상차가 90°가 되어야 함을 알 수 있다.

한편 일반적으로 자유피스톤형 선형압축기에서는 감쇄계수는 무시되며, 피스톤의 고유주파수는 식(6)과 같이 기계스프링과 가스스프링의 관계로 표현할 수 있다.

$$\omega_{nc} = \sqrt{(k_c + P_{oc} A_d / x_o) / m_c} \quad (6)$$

한편 팽창기 내의 왕복기의 운동은 압축공간의 압력 및 팽창공간의 압력차에 의해 발생하며, 따라서 왕복기의 거동은 식(7)과 같이 표현된다.

$$m_d \ddot{x}_d + k_d x_d + \Delta P_d \cdot A_d = 0 \quad (7)$$

따라서 왕복기의 고유주파수는 압축기의 고유주파수와 같이 식(8)과 같이 표현된다.

$$\omega_{nd} = \sqrt{(k_d + P_{do} A_d / x_d) / m_d} \quad (8)$$

한편 스테어링 냉동기의 운전주파수는 선형압축기 및 왕복기의 고유주파수를 고려하여 결정되어야 하며, 통상적으로 입력전력을 최소화하기 위해 선형압축기의 고유진동수에 근접한 영역에서 운전된다.

3. 실험장치 및 방법

선형압축기의 운전특성 및 왕복기의 압력강하 특성을 구하기 위해 Fig. 3과 같은 실험장치를 구성하였다.

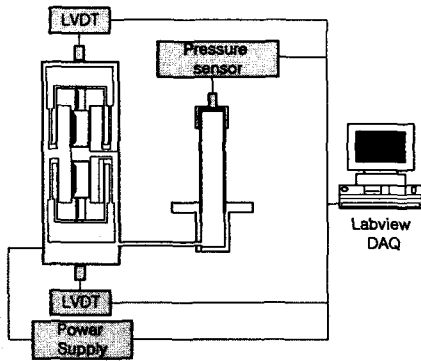


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 사용된 선형압축기는 1W급(냉각온도 80K) 냉동능력의 스테어링 냉동기용으로 설계, 제작된 dual acting 피스톤형의 이동코일형 선형압축기로, 선형압축기 내부에는 180°의 위상차를 가지고 왕복운동을 하는 두 개의 피스톤과 피스톤

에 구동력을 공급하는 코일 및 자석, 코일을 지지하기 위한 코일 지지대, 압축공간에서 생성된 압력 파형을 냉동기로 공급하기 위한 연결관으로 구성되어 있으며, 압축기의 외형은 직경 55 mm, 길이 120 mm이고, 선형 압축기 운전주파수와 정현파의 입력전류, 전압의 조절을 위해 Fujitsu사의 교류전원 공급장치를 사용하였다.

선형 압축기 각각의 피스톤의 행정거리를 측정하기 위해 Schaevitz사의 선형가동차동변환기(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)를 두 개의 피스톤의 끝단에 각각 부착하였으며, 압력 파형을 측정하기 위해 팽창기의 상부 및 하부에 PCB사의 압력센서(Piezoelectric pressure sensor)를 설치하였고, 이때 전류공급장치로부터 공급되는 입력전류 및 전압, 전력을 동시에 측정하였다. 측정된 입력전류, 전압, 행정거리 및 압력 파형은 Labview 프로그램을 이용하여 각각의 파형의 진폭, 위상 및 이때의 입력전력을 구하였다.^{(2),(3)}

실험은 일정한 인가 전압조건에서 10 ~ 20 kg/cm²G의 충전가스(GHe) 압력 및 운전주파수를 변화 시키면서 선형압축기 피스톤의 행정거리 및 압력 파형 특성을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

스테어링 냉동기 팽창부의 재생기로 인한 압력강하를 측정하기 위해 우선 팽창부의 재생기를 제거한 상태에서 팽창부 하부와 상부의 압력을 측정하여 팽창기 하부와 상부에 설치된 압력센서의 압력 및 압력위상에 대한 보정을 수행하였다. 또한 왕복기의 운동에 대한 불확실성을 제거하기 위해, 팽창기내의 왕복기를 길이 5mm의 팽창공간이 생성되도록 하여 고정하였다. 이때 사용된 재생기의 사양은 SUS304 재질의 #250으로, 선경은 약 40μ m, 재생기의 공극률은 0.68이다.

스테어링 냉동기에서 저온부 냉각의 발생은 팽창기내의 왕복기의 운동과 압력파형의 상관관계에 의해 팽창기의 끝단에서 발생된다. 따라서 왕복기를 고정한 본 실험에서는 저온부에서 냉각이 발생하지 않았다.

Fig. 4는 운전주파수 50Hz, 일정 인가전압 조건(10V)에서 충전압력의 변화에 따른 압축기의 생성 압력 및 압축비이다. 충전압력이 10 kg/cm²G

에서 20 kg/cm²G로 증가됨에 따라 선형압축기의 압축비는 감소하나, 선형압축기에서 생성되는 고압과 저압의 압력차이는 약 6 kg/cm² 정도로 나타나, 큰 변화가 발생하지 않았다.

Fig. 5는 이때 선형압축기 피스톤의 행정거리의 변화로 충전압력이 증가함에 따라 12 kg/cm²G까지는 다소 증가하나 이후에는 행정거리가 감소하는 특성을 나타내었다.

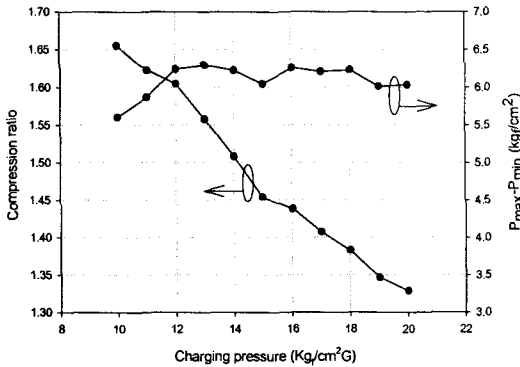


Fig. 4 Compressor performance with the various charging pressure

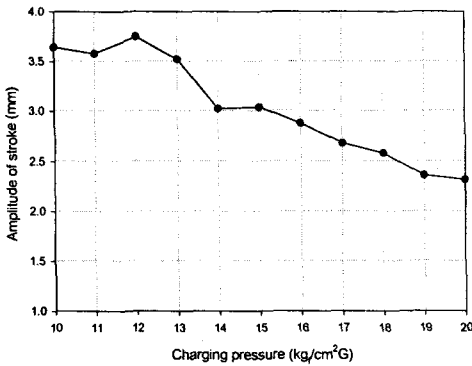


Fig. 5 Amplitude of piston stroke with the various charging pressure

Fig. 6은 충전압력 15 kg/cm²G에서 선형압축기 운전주파수의 변화에 따른 압축기 피스톤의 행정거리 및 피스톤의 운동과 이때 공급되는 전류의 위상차를 나타낸 그림이다. 피스톤의 행정거리는 운전주파수가 40Hz에서 60Hz로 증가함에 따라 다소 증가되는 경향을 나타내었으며, 이때 위상차는 크게 증가되었다. 선형압축기에서 공진점을

서 운전될 때 이론적인 위상차가 90도인점을 고려하면, 약 50Hz 부근이 선형압축기의 고유주파수임을 알 수 있다.

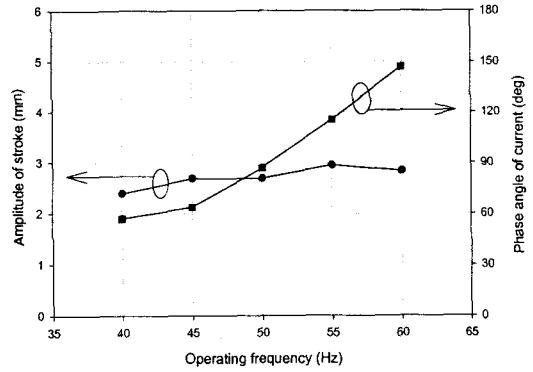


Fig. 6 Amplitude of stroke and phase with different operating frequency

Fig. 7은 팽창기 내의 왕복기를 고정하였을 때 운전주파수의 변화에 따른 재생기 양단의 압력차를 나타낸 그림이다. 이때 압력차의 +는 재생기 하단의 고온부의 압력이 팽창부보다 높음을 나타낸다.

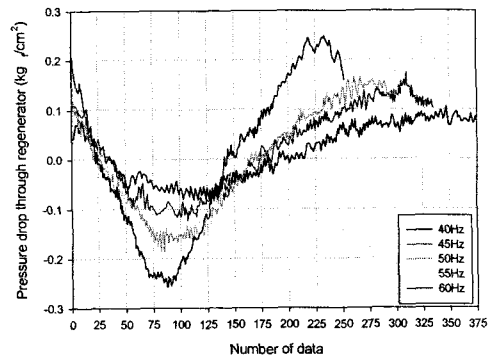


Fig. 7 Pressure difference

선형압축기 운전주파수가 40Hz일 때 재생기 양단의 압력차는 약 0.1 kg/cm² 미만인 발생하였으나, 운전주파수가 60Hz로 증가함에 따라 점차 증가하여, 60Hz의 경우 0.2 kg/cm² 를 상회하는 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 재생기 양단의 압력차는 충전압력에 비해 약 1.5% 미만이며, Fig. 4에 나타낸 선형압축기에 의해 발생하는 고

압과 저압의 차이 약 6kg/cm^2 의 약 4% 정도로 나타났다.

Fig. 8은 팽창기의 왕복기를 고정하였을 때 측정된 선형압축기의 압력과 재생기를 통과하면서 발생한 압력강하의 위상을 나타낸 그림이다. 이때 위상은 선형압축기 피스톤의 운동을 기준으로 나타내었다.

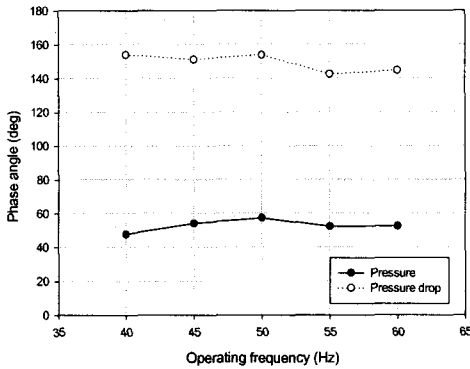


Fig. 8 Phase angle of pressure and pressure difference

운전주파수의 변화에 대해 압축공간의 압력 및 재생기 양단의 압력강하 파형의 위상은 큰 변화 없이 유사한 값을 나타내고 있고, 선형압축기 압축공간의 압력이 피스톤의 운동에 비해 약 50도 정도 선행함을 알 수 있으며, 압력과 압력강하 파형의 위상차는 약 90도로 나타났다. 이는 압력강하와 재생기를 통과하는 질량유속의 위상이 일치한다면, 재생기를 고정하였을 때 발생한 파형은 기본형 맥동관(basic pulse tube) 냉동기에서와 같이 정재파(standing wave)의 특성을 나타낸 것으로 판단된다.

Zhu 등⁽⁴⁾은 맥동관 냉동기의 재생기 저온측의 압력 및 질량유량을 측정하여 두 파형의 위상차를 분석한 결과, 버퍼공간과 맥동관을 연결하는 관(neck tube)의 길이의 변화에 따라 위상차가 변화함을 제시한 바 있다. 따라서 스테링 냉동기의 경우, 실제 운전조건에서의 위상차는 왕복기의 증립위치, 왕복기의 변위 등의 인자에 의해 영향을 받을 것으로 판단된다.

한편 스테링 냉동기는 압축기의 고유주파수 부근에서 운전될 때 최소의 입력전력이 소요되었으며, 추후 연구를 통해 실제 스테링 냉동기의 운

전조건에서의 압축공간과 팽창공간의 압력차 및 왕복기의 변위를 측정할 계획이다.

5. 결론

소형 1W급 냉각능력의 FPFD(Free Piston, Free Displacer) 방식 스테링 냉동기를 개발하기 위한 연구의 일환으로 선형압축기 및 냉각기를 설계, 제작하였고, 제작된 선형 압축기 및 재생기의 압력특성을 실험적으로 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다. 또한 본 연구를 통해 얻어진 결과들은 추후 왕복기의 운동을 분석하는 기초자료로 활용될 예정이다.

(1) 일정한 운전주파수에서 선형압축기가 운전될 때 충전압력이 증가하면 선형압축기에 의해 생성된 압력파형의 압축비는 감소하나, 이때 발생하는 압력파형의 고압과 저압의 압력차는 유사하게 나타났다.

(2) 스테링 냉동기의 압축공간과 팽창공간의 압력차 즉 재생기 양단의 압력차는 충전압력 및 압축기에 의해 생성되는 압력파형의 압력차에 비해 매우 작다.

(3) 스테링 냉동기의 압축공간과 팽창공간의 압력차는 선형압축기 운전주파수가 증가하면 커진다.

후기

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

참고문헌

- (1) S. W. K. Yuan, L. G. Naes and T. C. Nast, 1994, Prediction of natural frequency of the NASA 80K cooler by Stirling refrigerator performance model, Cryogenics, Vol. 34, pp. 383 - 388.

- (2) Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Deuk-Yong Koh, Hyo-Bong Kim, Koon-Sup Oh and Jong-Hak Kim, 2001, "Study of Stirling Cryocooler Performance with different length of split tube", Proceedings, KIASC Conference 2001, Mooju, pp. 37-40.
- (3) S. J. Park, Y. J. Hong, D. Y. Koh, K. S. Oh, H. K. Yeom and J. H. Kim, 2001, " Study of KIMM-E1 Stirling Cryocooler Performance with different Charging Pressure", Proceedings, KIASC Conference 2001, Mooju, pp. 33-36.
- (4) S. W. Zhu, S. L. Zhou, N. Yoshimura and Y. Matsubara, 1997, "Phase shift effect of the long neck tube for pulse tube refrigerator", Cryocoolers 9, pp. 269-278