

선형압축기형 스테링 냉동기의 운전특성에 관한 수치해석적 연구

홍용주, 박성제, 김효봉, 염한길
한국기계연구원

The Numerical Analysis of Performance of the Stirling Cryocooler

Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Han-Kil Yeom
Korea Institute of Machinery & Materials

yj hong@kimm.re.kr

Abstract - The purpose of this study is to analysis the charging gas effect on the resonance and performance characteristics of the linear compressor for small scale FPF Stirling refrigerator. To ensure high performance of FPF type Stirling refrigerator, the operating frequency of the refrigerator should be around the natural frequency of compressor. The gas spring effect which is induced from pressure change in cylinder due to motion of pistons has significant effect on the natural frequency of the compressor. The numerical results show the linear compressor has high natural frequency when the charging pressure of working fluid is high.

1. 서 론

스테링 사이클을 기반으로 하는 스테링 극저온 냉동기(Stirling Cryocooler)는 최저도달온도 및 냉동능력이 다른 냉동기에 비해 우수하여, 가스 액화장치로 상용화되었으며, 소형 스테링 냉동기는 주로 적외선 센서 및 전자장비의 냉각용(온도영역 : 30 ~ 100 K, 냉각능력 : 1 ~ 10 W)으로 사용되어지고 있다.

이상적인 스테링 냉동기의 작동과정은 등온압축, 등적이동, 등온팽창, 등적이동으로 구성되는 역스테링 사이클로, 스테링 냉동기는 증기압축식 냉동기에 비해 고온부와 저온부의 온도차가 커져도 성적계수(COP)의 저하가 작게 발생하며, 운전조건의 변화에도 냉동능력 및 압축비의 변화율이 작고, 친환경 냉매 채용 및 소형화가 가능한 장점을 지니고 있다.

스테링 냉동기는 피스톤 및 열교환기의 배치 방법에 따라 왕복기(displacer)형, 2 피스톤형, 복동(double acting)형으로, 압축기 및 팽창기(expander) 피스톤의 구동방식에 따라 기계방식과 자유피스톤(free piston) 방식으로 분류되며, 자유피스톤 방식은 선형모터(linear motor)를 사용하기 때문에 소형화 및 저소음화가 가능

하며, 무윤활의 비접촉기구를 사용하기 때문에 장수명이 가능한 장점을 지니고 있다.

자유피스톤 방식의 스테링 냉동기의 선형압축기 작동유체는 헬륨가스로, 피스톤의 행정거리에 따라 다른 압축 공간내 압력을 발생하며, 압력으로 인한 힘과 행정거리의 상관관계는 이상적인 기계스프링과 유사한 특성으로 나타낸다. 따라서 스테링 냉동기의 선형압축기의 고유진동수는 기계스프링 뿐만 아니라 충전가스에 의해 생성되는 가스스프링에 의해서도 영향을 받게된다.

고효율의 스테링 냉동기를 설계하기 위해서는 입력전력이 최소화되어야 하며, 따라서 선형압축기 피스톤을 구동하는데 소요되는 힘이 최소화되는 냉동기의 고유진동수에서 스테링 냉동기가 운전되도록 설계된다. 또한 운전주파수는 변위기(displacer)의 고유진동수와와의 관계도 고려되어야 한다.

스테링 냉동기의 선형압축기의 고유진동수는 피스톤의 직경, 압축기의 행정거리, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관의 크기, 재생기의 크기, 구동부의 질량, 작동유체의 충전압력 등의 여러 인자에 의해 결정된다.

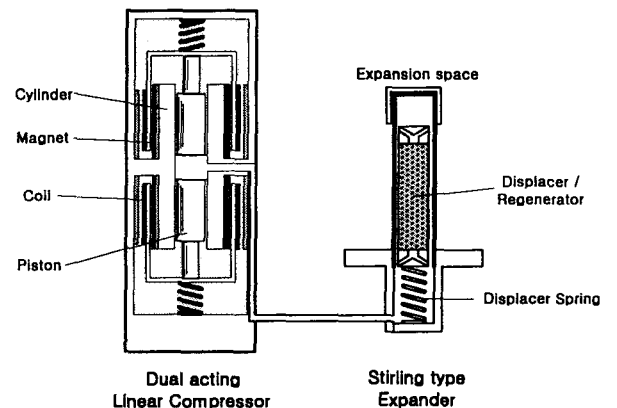


Fig. 1. FPF type Stirling cryocooler

Yuan et al.[1]은 NASA 80K 극저온 냉동기에 대한 해석을 통해, 냉동기의 고유진동수를 예측하였으며, 피스톤의 직경이 고유진동수에 큰

영향을 미치며, 구동부의 질량을 조절함으로써 냉동기의 열역학적 특성의 큰 변화없이 고유진동수를 조절할 수 있음을 보고한 바 있다.

Heun et al.[2]은 선형압축기 피스톤의 운전형태에 따라 충전가스가 냉동기의 공진특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다.

또한 Hong et al.[3]은 연결관(split tube)의 크기가 냉동기의 성능 및 고유진동수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며 Park et al.[4]은 냉동기 작동유체의 충전압력이 냉동기의 성능 및 고유주파수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 이동코일(moving coil) 방식의 선형압축기, 연결관, 재생기(regenerator)를 내장한 왕복기, 팽창기로 구성되는, 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 소형 FFPD (Free Piston, Free Displacer) 방식 스테링 냉동기의 주요 운전 변수인 충전압력에 의한 영향을 수치해석적 방법을 통해 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 스테링 냉동기의 동특성

FFPD형 스테링 극저온 냉동기의 선형압축기 피스톤 및 변위기의 동적특성은, 전자기력에 의해 구동되는 선형압축기 피스톤은 관성력, 마찰력, 스프링힘 및 피스톤 양단의 압력차에 의해 변위(x_c)가 결정되며, 변위기는 작동유체가 변위기내의 재생기를 통과하면서 발생하는 압력강하에 의해 변위(x_d)가 결정되며, 이는 다음과 같은 식 (1) 및 (2)의 운동방정식으로 표현된다.

$$m_c \ddot{x}_c + c_c \dot{x}_c + k_c x_c + A_c(P_c - P_b) = B_g \dot{l}i/2 \quad (1)$$

$$m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = \sum_i \Delta P_i A_i \quad (2)$$

또한 선형압축기로 공급되는 전압(V)은 식 (3)과 같이 코일저항(R), 인덕턴스(L), 피스톤의 운동으로 인한 전자기항으로 표현할 수 있다.

$$V = Ri/2 + L/2 \frac{di}{dt} + b_g l \frac{dx_c}{dt} \quad (3)$$

한편 선형압축기 피스톤 및 변위기의 운동에 의해서 발생하는 압력(P_c)은 다음과 같다.

$$P_c = P_m \left\{ 1 + 2A_c \psi \frac{x_c}{T_{hot}} - \left[\frac{1}{T_{hot}} - \frac{1}{T_{cld}} \right] A_d \psi x_d \right\} \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \psi = \frac{1}{V_{dc}/T_{hot} + V_{reg}/T_{reg} + V_{dd}/T_{cld}}$$

P_m 은 충전압력, T_{hot} 은 고온부의 온도, T_{cld} 는 저온부의 온도를 각각 나타낸다.

식(4)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과

같은 식(5)의 선형압축기 피스톤의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m_c \ddot{x}_c + c_c \dot{x}_c + [k_c + k_g] x_c = P_m A_c A_d \psi \left[\frac{1}{T_{hot}} - \frac{1}{T_{cld}} \right] x_d + B_g \dot{l}i/2 \quad (5)$$

$$\text{여기서 } k_g = P_m A_c^2 \left[\frac{2\psi}{T_{hot}} + \frac{1}{V_{db}} \right]$$

따라서 선형압축기의 충전압력에 따른 고유주파수(ω_n)는 다음과 같은 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_c + P_m A_c^2 \left[\frac{2\psi}{T_{hot}} + \frac{1}{V_{db}} \right]}{m_c}} \quad (6)$$

한편 재생기를 통과하는 압력강하(ΔP)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{1}{2} \frac{\dot{m}_{reg}^2}{\rho \Psi^2 A_d^2} \quad (7)$$

여기서 f 는 재생기를 통과하는 유동의 마찰계수(darcy friction factor), L 은 재생기의 길이, D_h 는 수력직경(hydraulic diameter), Ψ 는 재생기의 공극률(porosity), \dot{m}_{reg} 은 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량을 각각 나타낸다.

식(7)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(8)의 변위기 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d \pm [1 - \Phi] \frac{f \dot{m}_{reg}^2 L}{2 \Psi^2 \rho D_h A_d} = 0 \quad (8)$$

이때 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량(\dot{m}_{reg})은 다음의 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{reg} = -\frac{P_c}{R} \left[\frac{V_{dc}}{T_{hot}} - \frac{2A_c x_c}{T_{hot}} + \frac{V_{dd}}{T_{cld}} + \frac{A_d \dot{x}_d}{T_{cld}} \right] - \frac{P_c}{R} \left[-\frac{2A_c \dot{x}_c}{T_{hot}} + \left(\frac{1}{T_{hot}} - \frac{1}{T_{cld}} \right) A_d \dot{x}_d \right] \quad (9)$$

따라서 식(3), (5), (8)을 연립하여 해석하면 스테링 극저온 냉동기 선형압축기의 피스톤 및 변위기의 운동 및 공급되는 전압 및 전류특성을 파악할 수 있다.

또한 저온부의 열손실 및 압력손실을 무시한 이론적인 순수냉동능력(Q_{ideal})은 식(10)으로 표현되며, 선형압축기의 효율(η_c)은 식(11)로 나타

낼 수 있다.

$$Q_{ideal} = \int_0^{\tau} P_c A_d dx_d \quad (10)$$

$$\eta_c = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \theta - I_{rms}^2 R}{V_{rms} I_{rms} \cos \theta} \quad (11)$$

2.2 해석방법 및 조건

해석은 선형압축기로 공급되는 전압을 정현파로 가정하여 수행하였으며, 압축기 피스톤 변위, 변위기 변위, 전류에 대한 미분방정식을 초기값을 가정한 후 일정한 시간간격에 대해 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하여, 반복적으로 해를 구하여, 피스톤 변위, 변위기 변위, 전류가 이전 계산 단계에서의 계산값과의 오차가 일정한 범위내로 감소하는 조건을 만족할 때까지 수행하였다. 해석의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

한편 해석 대상 스테어링 냉동기는 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 냉동능력 1W급 소형 FPDF 방식의 스테어링 냉동기로, 선형압축기 실린더 직경, 팽창기 실린더 직경, 운전제적, 추력상수 및 재생기의 주요 제원은 표 1과 같다.

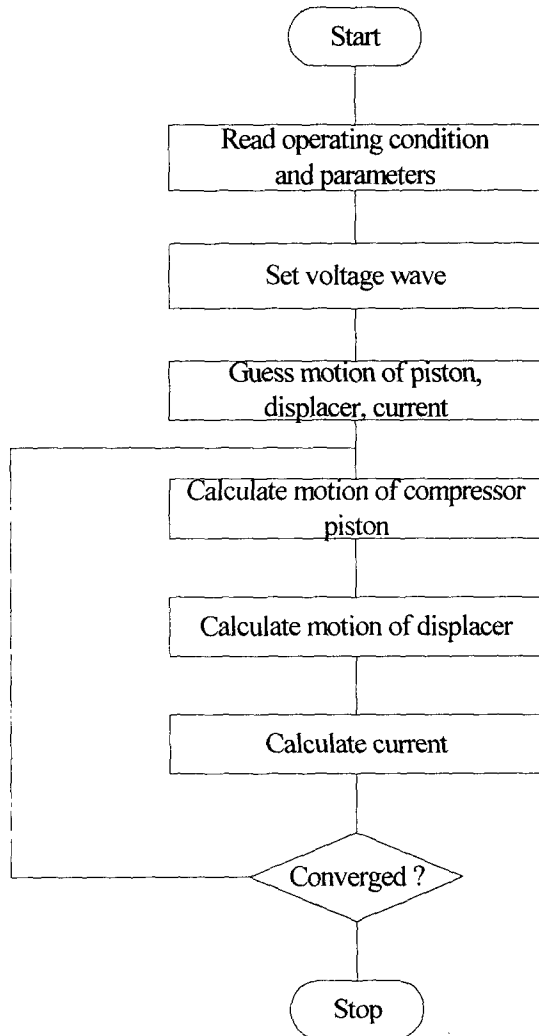


Fig. 2. Flow chart of the analysis

Table 1. Calculation parameter

Item	Value
Operating frequency	50 Hz
Diameter of Compressor cylinder	12 mm
V_{cd}	3065.5 mm ³
Diameter of expander cylinder	6 mm
V_{dt}	178 mm ³
Thrust constant of the compressor	6.615
Regenerator	#250
Porosity	0.6234

2.3 해석결과 및 고찰

해석은 선형압축기로 공급되는 전압의 실효치가 10V인 경우에 대해 수행하였으며, Fig. 3은 스테어링 냉동기의 충전압력에 따른 고유진동수이다. 이때 저온부의 온도는 실험결과와의 비교를 위하여 고온부의 온도와 동일한 값으로 설정하였다. 이는 식(6)에서도 알 수 있는 바와 같이 저온부의 온도가 변화하면 고유진동수가 변화하기 때문이다. 식(6)에 의한 고유진동수는 실험결과와 비교적 유사한 경향을 나타내고 있으나, 충전압력이 증가할수록 다소 편차가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 스테어링 냉동기의 작동가스인 헬륨의 열적특성이 등온과정과는 다소 거리가 있고, 충전압력이 증가할수록 등온과정보다는 단열과정으로 접근하기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 충전압력이 15kgf/cm²G일 때 해석결과로, 그림은 선형압축기 피스톤의 변위와 전압, 전류의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 해석결과는 압축기 피스톤의 최대 변위는 약 5mm, 입력전류 3.47A로 나타났으며, 역율은 99.87%로 나타나, 이때의 입력전력은 34.7W로 예측되었다. 또한 압축기의 변위와 전류의 위상차는 약 117.5도로 나타났으며 선형압축기의 고유주파수는 Fig. 3에서 약 50Hz로 나타난 것과는 달리 저온부의 온도 변화로 인해 약 46Hz로 나타났다.

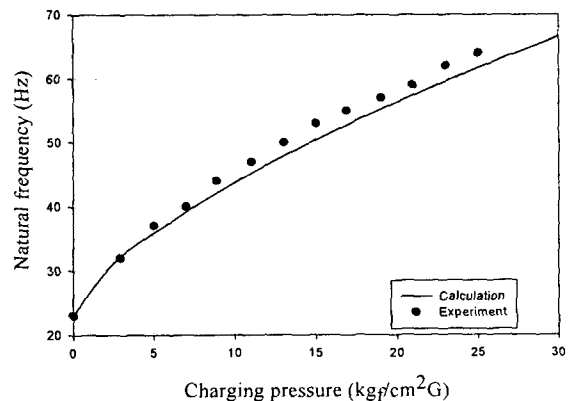


Fig. 3. The natural frequency of linear compressor

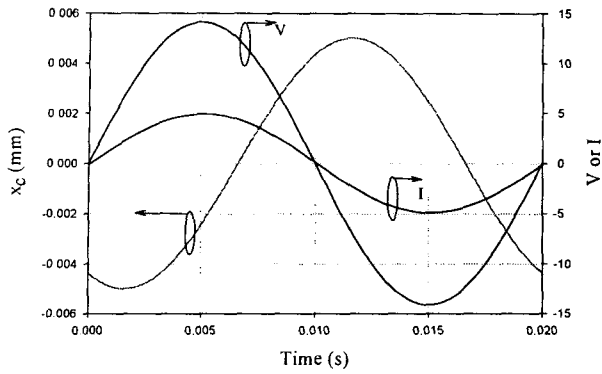


Fig. 4. x_c and V , I at the charging pressure $15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$

Fig. 5는 입력전압이 10V인 경우 충전압력이 $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 로 변화할 때 선형압축기로 공급되는 전류, 피스톤의 변위 및 전력을 나타낸 그림이다. 충전압력의 증가에 따라 입력전류의 값은 점차 감소하여, $18 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 에서 최소화된다. 입력전력은 전류 뿐만 아니라 역율의 감소로 인하여 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 한편 선형압축기 피스톤의 변위 역시 충전압력의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

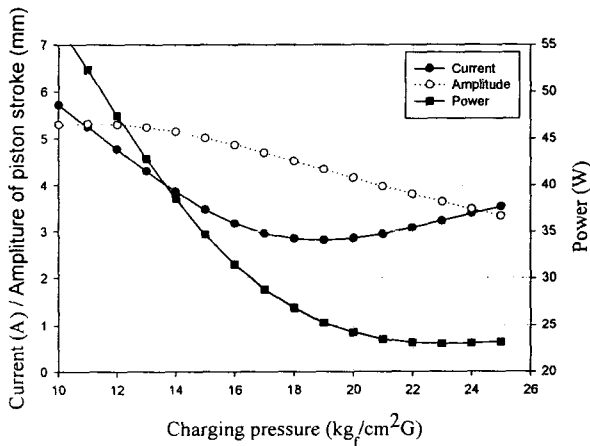


Fig. 5. I , x_c and power with different charging pressure

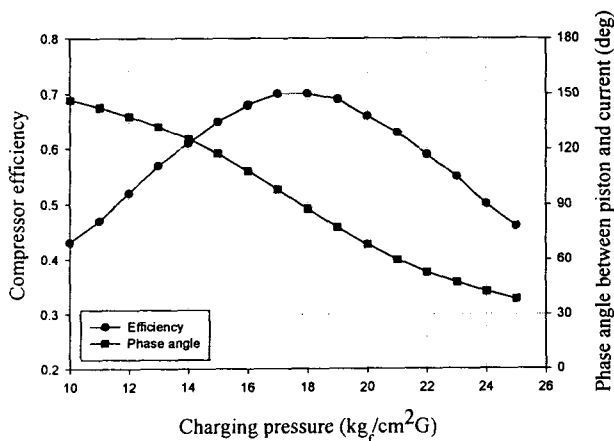


Fig. 6. compressor efficiency and phase angle with different charging pressure

Fig. 6은 압축기의 효율과 전류와 변위의 위상차를 나타낸 그림이다. 압축기의 효율은 $16 \sim 17 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 일 때 최대를 나타내었고, 위상차는 충전압력의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 해석결과는 약 $18 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 일 때 90도 부근으로 나타나, 최적의 조건으로 예측되었다.

3. 결 론

이동코일(moving coil) 방식의 선형압축기, 연결관, 재생기(regenerator)를 내장한 왕복기, 팽창기로 구성되는, 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 소형 FPF방식 스테링 냉동기의 동특성 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 예측된 선형압축기의 공진주파수는 실험 결과와 부합되는 경향을 나타내었다.
- (2) 충전압력의 증가에 따라 입력전류는 공진주파수에 근접할수록 감소하여 최소화된다. 한편 압축기의 효율은 공진주파수에서 운전될 때 최대의 값을 나타낸다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] S. W. K. Yuan and etc. "Prediction of natural frequency of the NASA 80K cooler by Stirling refrigerator performance model", *Cryogenics*, Vol. 34, pp. 383 - 388, 1994
- [2] M. K. Heun, and etc., "Investigation of Gas Effects on Cryocooler Resonance Characteristics", *Cryocoolers* 9, pp. 421-430, 1997
- [3] Yong-Ju Hong and etc., "Study of Stirling Cryocooler Performance with different length of split tube", *Proceedings, KIASC Conference, Mooju*, pp. 37-40, 2001
- [4] S. J. Park and etc., "Study of KIMM-E1 Stirling Cryocooler Performance with different Charging Pressure", *Proceedings, KIASC Conference, Mooju*, pp. 33-36, 2001