

스터링 냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 수치해석적 연구

Numerical Analysis of Performance of Linear Compressor for the Stirling Cryocooler

홍용주*, 박성제*, 김효봉*, 염한길*, 최영돈**

Y. J. Hong*, S. J. Park*, H. B. Kim*, H. K. Yeom*, Y. D. Choi**

Abstract : The purpose of this study is to analyze the charging gas effect on the resonance and performance characteristics of the linear compressor for small scale FPPD Stirling refrigerator. To ensure high performance of FPPD 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, and the stroke of compressor, current, input power and efficiency of compressor were shown with different operating conditions.

Key Words : Stirling refrigerator, linear compressor, operating frequency, dynamic characteristics

1. 서 론

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

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

스터링 냉동기는 피스톤 및 열교환기의 배치방법에 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 가능하며, 무윤활의 비접촉기구를 사용하기 때문에 장수명이 가능한 장점을 지니고 있다.

자유피스톤 방식의 스텐링 냉동기의 선형압축기 작동 유체는 헬륨가스로, 피스톤의 행정거리에 따라 다른 압축 공간내 압력을 발생하며, 압력으로 인한 힘과 행정거리의 상관관계는 이상적인 기계스프링과 유사한 특성으로 나타낸다. 따라서 스텐링 냉동기의 선형압축기의 고유진동수는 기계스프링 뿐만 아니라 충전가스에 의해 생성되는 가스스프링에 의해서도 영향을 받게 된다. 고효율의 스텐링 냉동기를 설계하기 위해서는 입력전력이 최소화되어야 하며, 따라서 선형압축기 피스톤을 구동하는데 소요되는 힘이 최소가 되는 냉동기의 고유진동수에서 스텐링 냉동기가 운전되도록 설계된다. 또한 운전주파수는 변위기(displacer)의 고유진동수와와의 관계도 고려되어야 한다. 스텐링 냉동기의 선형압축기의 고유진동수는 피스톤의 직경, 압축기의 행정거리, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관의 크기, 재생기의 크기, 구동부의 질량, 작동유체의 충전압력 등의 여러 인자에 의해 결정된다.

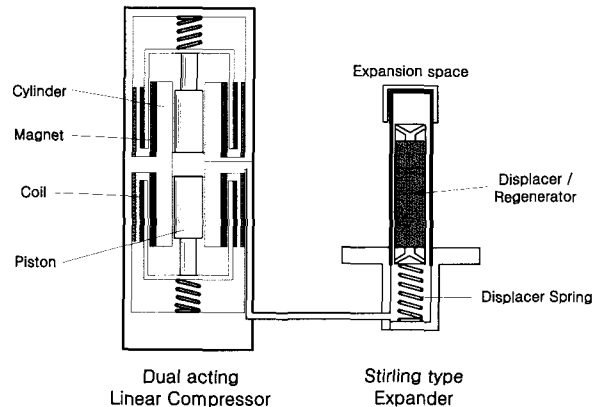


그림 1. 자유피스톤형 스텐링 냉동기
Fig. 1. The FPPD type Stirling refrigerator

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.

홍용주 등[3]은 충전압력 및 운전주파수의 변화에 따른 선형압축기의 운전특성에 대한 실험적 연구를 통해, 고유주파수특성을 규명하였으며, 김효봉 등[4]은 연결관(split tube)의 길이변화가 스텐링냉동기의 성능 및 공진주파수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 박성제 등[5]은 스텐링냉동기 작동유체의 충전압력이 냉동기의 성능 및 고유주파수에 미치는 영향에 대

* 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체공정기술연구부
* 비 회 원 : 고려대학교 기계공학과
원고접수 : 2002년 03월 30일
심사완료 : 2003년 01월 13일

한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 이동코일(moving coil) 방식의 선형 압축기, 연결관, 재생기(regenerator)를 내장한 변위기, 팽창기로 구성되는, 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 소형 FPPD(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

FPPD형 스테링 극저온 냉동기의 선형압축기 피스톤 및 변위기의 동특성은, 전자기력에 의해 구동되는 선형압축기 피스톤은 관성력, 마찰력, 스프링 힘 및 피스톤 양단의 압력차에 의해 변위(x_c)가 결정된다.[2,3] 한편 변위기는 선형압축기에 의해 공급된 작동유체가 변위기내의 재생기를 통과하면서 발생하는 압력강하에 의해 변위(x_d)가 결정되며, 이는 다음과 같은 식 (1) 및 (2)의 운동방정식으로 표현된다.

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

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

여기서 m 은 구동부의 질량, c 는 감쇄계수, k 는 코일스프링 강성계수, P_c 는 압축공간압력, P_b 는 버퍼공간압력, A 는 실린더의 단면적, b_g 는 자속, l 은 코일길이, i 는 인가전류를 각각 의미하며, 하첨자 b, c, d 는 각각 버퍼공간 및 압축기와 변위기를 의미한다.

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

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

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

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

여기서 $\alpha = \frac{1}{V_{dc}/T_{hot} + V_{reg}/T_{reg} + V_{dd}/T_{cld}}$, P_m 은

작동유체의 충전압력, T_{hot} 은 고온부의 온도, T_{cld} 는 저온부의 온도를, V_{dc} , V_{dd} , V_{reg} 는 압축공간, 팽창공간, 재생기의 평균체적을 나타낸다. 식(4)를 식(1)에 대입하여 정리하면, 식(5)의 선형압축기 피스톤의 운동방정식을 얻을 수 있다.

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

여기서 $k_g = P_m A_c^2 \left[\frac{2\alpha}{T_{hot}} + \frac{1}{V_{db}} \right]$ 이고, 가스스프링 상

수를 의미하며, V_{db} 는 버퍼공간의 평균체적을 의미한다. 따라서 선형압축기의 충전압력에 따른 고유주파수(ω_n)는 코일스프링강성 및 가스스프링의 강성에 의해 표현되는 다음과 같은 식(6)으로 나타낼 수 있다.

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

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} 는 재생기를 통과하는 작동유체의 질량유량을 각각 나타낸다.

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

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

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

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

따라서 식(3), (5), (8)을 연립하여 해석하면, 스테링 냉동기 선형압축기의 피스톤 및 변위기의 운동 및 선형압축기로 공급되는 전압 및 전류특성을 파악할 수 있다. 또한 저온부의 열손실 및 압력손실을 무시한 이론적인 순수냉동능력(Q_{ideal})은 식(10)으로 표현된다. 선형압축기의 손실은 피스톤의 마찰, 간극을 통한 작동유체의 누설, 코일의 열손실(Joule heating) 등이 있으나, 본 연구에서는 열손실만을 고려하여 선형압축기의 효율(η_c)을 식(11)로 정의하였다.

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

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

2.2 해석방법 및 조건

해석은 선형압축기로 공급되는 전압을 정현파로 가

정하여 수행하였으며, 압축기 피스톤 변위, 변위기 변

표 1. 해석 조건

Table 1. Calculation parameter

Item	Value
Operating frequency	45 ~ 55 Hz
Dia. of compressor cylinder(D_c)	12 mm
Resistance (R)	2 ohm
Inductance (L_c)	0.0067 H
Vol. of compression space (V_{cd})	3065.5 mm ³
Dia. of expander cylinder (D_d)	6 mm
Vol. of expansion space (V_{dd})	178 mm ³
Thrust constant (B_{gl})	6.615
Regenerator	#250
Porosity (Ψ)	0.6234

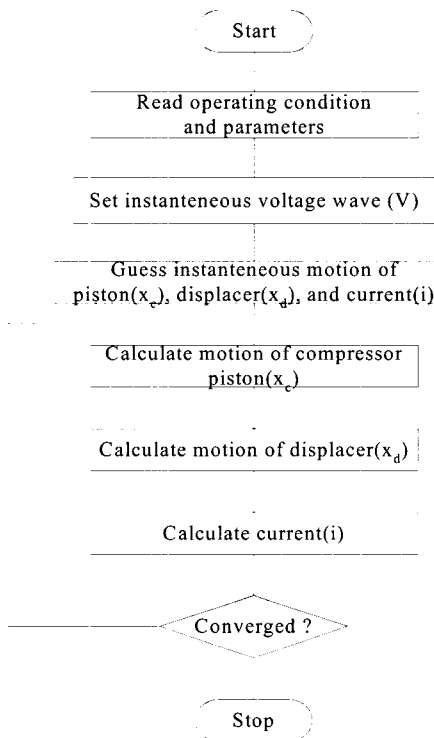


그림 2. 해석 흐름도

Fig. 2. Flow chart of the analysis

위, 전류에 대한 미분방정식을 초기값을 가정한 후, 일정한 시간 간격 (0.002초)에 대해 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하여, 반복적으로 해를 구하여, 피스톤 변위, 변위기 변위가 이전 계산 단계 계산값과의 오차가 일정한 범위 이내(10^{-5})인 조건을 만족할 때 수렴한 것으로 판정하였다. 해석의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

한편 해석 대상 스테링 냉동기는 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되어지는 냉동능력 1W(@77K)급 소형 FPPD 방식의 스테링 냉동기로, 선형압축기 실린더 직경, 팽창기 실린더 직경, 운전체적, 추력상수(thrust constant) 및 재생기의 주요 제원은 Table 1과 같다. 해석은 10~25kgf/cm²G의 충전압력 범위 및 45~55Hz의 운전주파수 및 고온부의 온도는 300K, 저온부의 온도는 77K인 경우에 대해서 수행하였다.

2.3 해석결과 및 고찰

해석은 선형압축기로 공급되는 전압의 실효치가

10V인 경우에 대해 수행하였으며, Fig. 3은 스테링 냉동기의 충전압력에 따른 고유진동수이다. 이때 저온

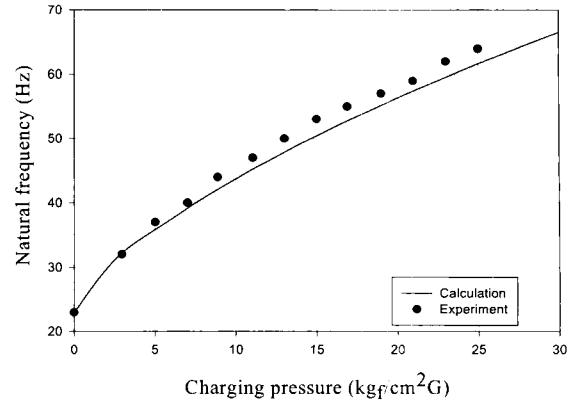


그림 3. 충전압력변화에 따른 고유진동수

Fig. 3. The natural frequency of linear compressor

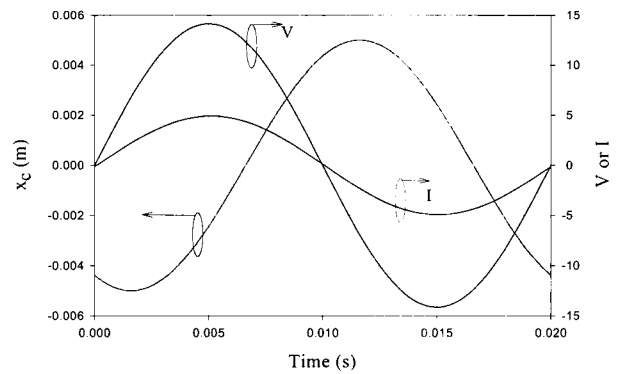


그림 4. 선형압축기 변위, 전압, 전류파형 (15 kgf/cm²G 충전시)

Fig. 4. wave form of x_c and V, I at the charging pressure 15 kgf/cm²G

부의 온도는 홍용주 등[3]의 실험결과와의 비교를 위하여 고온부의 온도와 동일한 값으로 설정하였다. 이는 식(6)에서도 알 수 있는 바와 같이 고온부 및 저온부의 온도조건이 변화하면 고유진동수가 변화하기 때문이다. 식(6)에 의한 고유진동수는 실험결과와 비교적 유사한 경향을 나타내고 있으나, 충전압력이 증가할수록 다소 편차가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 스테링 냉동기의 작동가스인 헬륨의 열적특성이 등온과정과는 다소 차이가 있고, 충전압력이 증가할수록, 코일스프링의 영향보다는 가스스프링의 영향이 증가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 4는 충전압력이 15kgf/cm²G일 때 해석결과로, 그림은 선형압축기 피스톤의 변위와 전압, 전류의 한 주기 동안 시간에 따른 변화를 나타낸다. 해석결과는 압축기 피스톤의 최대 변위는 약 5mm, 입력전류 실효치가 3.47A로 나타났으며, 선형압축기의 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. 5는 입력전압이 10V, 운전주파수 50Hz인 경우, 충전압력이 10 ~ 25 kgf/cm²G로 변화할 때 선형압축기로 공급되는 전류, 피스톤의 변위 및 전력을 나

타낸 그림이다. 충전압력의 증가에 따라 입력전류의 값은 점차 감소하여, 18kgf/cm²G에서 최소화된

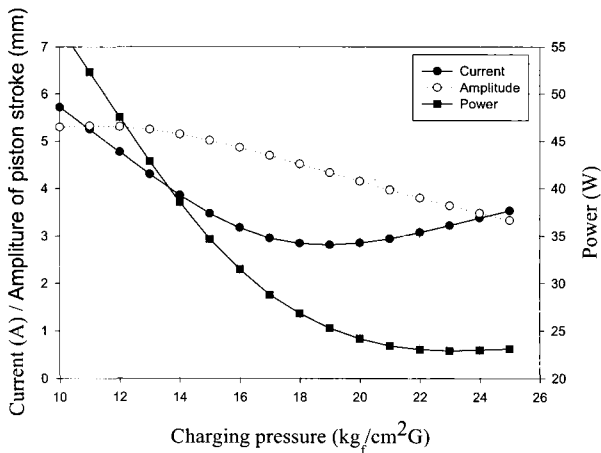


그림 5. 충전압력변화에 따른 압축기 변위, 전류, 입력전력 특성(V_{rms}=10V)

Fig. 5. Characteristics of the compressor stroke, current and input power with different charging pressure

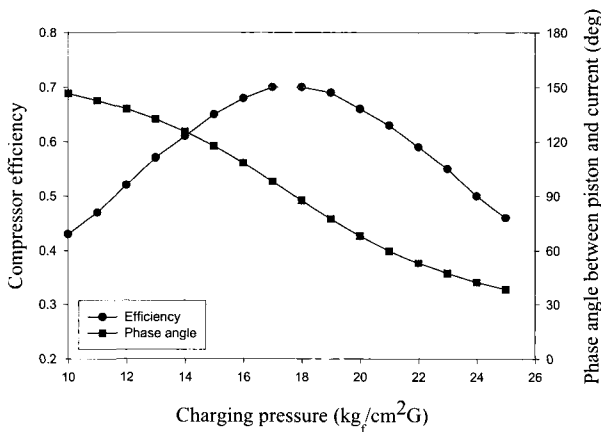


그림 6. 충전압력변화에 따른 압축기 효율, 위상특성 (V_{rms}=10V)

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

다. 한편 입력전력은 전류 뿐만 아니라 역률의 감소로 인하여 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 선형압축기 피스톤의 변위 역시 충전압력의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 선형압축기의 효율과 전류와 변위파형의 위상차를 나타낸 그림이다. 선형 압축기의 효율은 충전압력이 17 ~ 18 kgf/cm²G일 때 약 70%로 최대의 값을 나타내었고, 위상차는 충전압력의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한 해석결과는 50Hz의 운전주파수인 경우, 충전압력이 약 18 kgf/cm²G일 때 위상각이 90도 부근으로 나타나, 운전주파수가 선형압축기의 고유주파수와 일치하며, 최대의 압축기 효율로 나타나, 최적의 선형압축기 운전조건으로 예측되었다.

Fig. 7은 충전압력 18 kgf/cm²G, 50Hz 운전시 인가전압의 변화에 따른 압축기 변위, 전류 및 입력전력 특성이다. 선형압축기의 인가전압이 증가함에 따라, 압축기 피스톤의 변위, 전류 및 입력전력이 선형적으로 증가됨을 알 수 있으며, 이때 압축기의 효율은 70%로

일정하게 나타났다.

Fig. 8은 충전압력 18 kgf/cm²G, 인가전압 10V

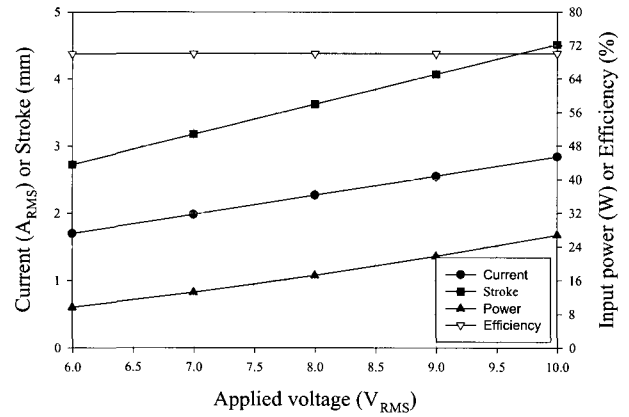


그림 7. 인가전압 변화에 따른 압축기 특성 (50Hz)

Fig. 7. Characteristics of the compressor with different applied voltage

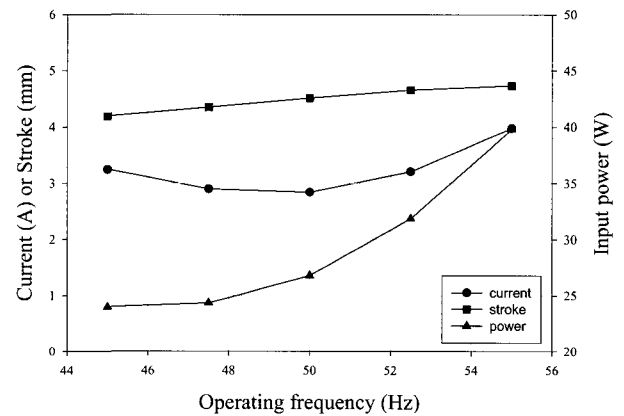


그림 8. 운전주파수변화에 따른 압축기 특성 (V_{rms}=10V)

Fig. 8. Characteristics of the compressor with different operating frequency

의 경우, 운전주파수 변화에 따른, 선형압축기의 운전특성을 나타낸 그림이다. 운전주파수가 증가함에 따라 전류는 감소하여, 50Hz에서 최소화 값을 나타내고 50Hz 이상의 운전주파수에서는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있어 50Hz에서 최적의 운전조건이 형성됨을 알 수 있다. 한편 압축기의 변위는 운전주파수가 증가함에 따라 완만한 증가의 경향을 나타내고 있으나, 입력전력은 크게 증가함을 알 수 있다.

3. 결 론

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

- (1) 등온과정으로 예측된 선형압축기의 고유진동수는 실험결과와 부합되는 경향을 나타내었다.
- (2) 충전압력의 증가에 따라 입력전류는 운전주파수가 고유진동수에 근접할수록 감소하여 최소화된다. 한

편 압축기의 효율은 고유진동수에서 운전될 때 최대의 값을 나타낸다.

(3) 일정한 충전압력조건에서 인가전압의 변화는 압축기의 특성에 큰 영향을 미치지 않으며, 입력전압과 압축기 변위, 전류, 입력전력이 선형적으로 비례한다.

(4) 일정한 충전압력조건 및 인가전압 조건에서 운전주파수의 변화는 압축기의 입력전력의 큰 변화를 초래하며, 최적의 선형압축기 운전조건을 위해서는 운전주파수는 고유주파수에 근접하게 설계되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02) 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] 홍용주, 박성제, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "스터링 냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", *한국초전도·저온공학회논문지*, 3권, 2호, pp. 49-54, 2001
- [4] 김효봉, 박성제, 홍용주, 고득용, 김종학, 유병건, 박종호, "작동주파수와 연결관 길이 변화가 스텐링 냉동기의 성능에 미치는 영향", *한국초전도·저온공학회논문지*, 3권, 2호, pp. 55-61, 2001
- [5] 박성제, 홍용주, 김효봉, 고득용, 김양훈, 유병건, 이기백, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스텐링 냉동기 개발", *한국초전도·저온공학회논문지*, 3권, 2호, pp. 62-68, 2001

저 자 소 개



홍용주(洪溶柱)

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



박성제(朴聖濟)

1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원



김효봉(金孝峰)

1960년 04월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 2002년 충남대 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 주임기술원



엄한길(嚴漢吉)

1966년 09월 03일생, 1990년 인하대 공대 항공공학과 졸업, 1992년 동대학원 항공공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 선임연구원



최영돈(崔英敦)

1950년 05월 30일생, 1973년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1975년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사), 1979년 KAIST 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 기계공학과 교수