

스테링 냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구

Study of the Linear Compressor Characteristics of The Stirling Refrigerator

홍용주*, 박성제*, 김효봉*, 고득용*, 김종학**, 유병진**

Y. J. Hong*, S. J. Park*, H. B. Kim*, D. Y. Koh*, J. H. Kim**, B. K. Yu**

Abstract : The purpose of this study is to analyze the characteristics of the linear compressor for Stirling refrigerator. To ensure high performance and long life of the FPDF(Free Piston, Free Displacer) type Stirling refrigerator, the operating parameters of the linear compressor should be optimized. The experimental results show that the operating frequency of the linear compressor has significant effect on the input power characteristics, and that the compressor with higher charging pressure of working fluid has high pressure ratio. For the high performance of the linear compressor, compressor should be operated at the resonance frequency with respect to the given charging pressure.

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

스톤 방식의 스테링냉동기는 소형화 및 저소음화가 가능하며, 피스톤이 무윤활의 비접촉기구를 사용하기 때문에 장수명이 가능한 장점을 지니고 있어, 최근 군수용 및 민수용 소형 스테링 냉동기(온도영역 : 30 ~ 100 K, 냉각능력 : 1 ~ 10 W)의 주류를 이루고 있다.

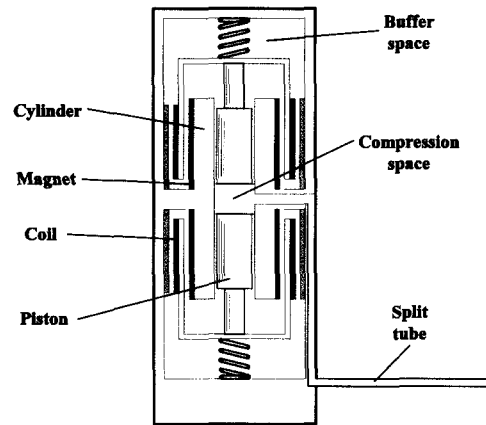


그림 1. 스테링 냉동기용 선형압축기
Fig. 1. The linear compressor for Stirling refrigerator

1. 서 론

스테링 극저온 냉동기(Stirling refrigerator)는 80K 이하의 낮은 최저도달온도와 카르노(Carnot) 효율을 달성할 수 있는 역스테링 사이클을 이용하는 기계식 냉동기로, 높은 이론 성능계수(COP)를 나타낼 수 있는 극저온냉동기이다.

스테링 냉동기는 1860년대 스코틀랜드의 A. Kirk에 의해 개발되어진 이래, 주로 적외선 탐상장비에 장착되어 적외선소자를 80K 이하의 온도로 냉각시키는 냉각기 및 고진공펌프(cryopump)로 실용화되어 양산되고 있으며, 특히 소형 극저온냉동기 분야에서 스테링 냉동기는 소형, 경량, 고효율의 장점을 지니고 있다.

일반적으로 적외선소자 냉각기로 사용되어지는 소형 스테링 냉동기는 압축기 피스톤을 구동하는 구동모터와 재생기(regenerator), 변위기(displacer) 등으로 구성되는 팽창기(expander)로 구성되어 있다.

압축기 피스톤을 구동하는 구동모터는 크랭크기구를 이용하여 피스톤을 구동하는 냉동기의 경우 회전모터가 사용되어지고, 자유피스톤(free piston) 방식의 스테링 냉동기의 경우 선형모터(linear motor)가 사용된다.

선형압축기(linear compressor)를 채용한 자유피

스톤 냉동기의 선형압축기는 실린더, 피스톤, 코일, 자석 등으로 구성되어 있으며, 구동 방식에 따라 이동코일(moving coil)형과 이동자석(moving magnet)형으로 분류되며, 피스톤의 왕복운동을 통해 압축공간에서 압력 파형을 생성하여 팽창기의 고온부와 연결된 연결관(split tube)을 통해 팽창기로 압력 파형을 공급한다.

생성된 압력 파형의 크기는 스테링 냉동기의 성능을 결정하는 주요한 인자로 작용한다. 또한 선형 압축기는 스테링 냉동기의 내구성 및 신뢰성을 결정하는 주요한 인자이다.

자유피스톤 방식의 스테링 냉동기의 선형압축기 작동유체는 헬륨가스로, 피스톤의 행정거리에 따라 압축공간내 압력이 달라지며, 압력으로 인한 힘과 행정거리의 상관관계는 이상적인 기계스프링과 유사한 특성으로 나타난다. 따라서 스테링 냉동기의 고유주파수는 기계스프링 뿐만 아니라 충전가스에 의해 생성되는 가스스프링에 의해서도 영향을 받게된다.

또한 고효율의 스테링 냉동기를 설계하기 위해서는 입력전력이 최소화되어야 하며, 따라서 선형압축기 피스톤을 구동하는데 소요되는 힘이 최소가 되는 냉동기의 고유주파수에서 스테링 냉동기가 운전되도록 설계된다.

한편 스테링 냉동기의 고유주파수는 피스톤의 직경, 압축기의 행정거리, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결

* 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체환경연구부

** 정 회 원 : 우영기술원

원고접수 : 2001년 10월 06일

심사완료 : 2001년 11월 09일

관의 크기, 재생기의 크기, 구동부의 질량, 작동유체의 충전압력 등의 여러 인자에 의해 결정된다.

Yuan 등[1]은 NASA 80K 극저온 냉동기에 대한 해석을 통해, 냉동기의 고유주파수를 예측하였으며, 피스톤의 직경이 고유주파수에 큰 영향을 미치며, 구동부의 질량을 조절함으로써 냉동기의 열역학적 특성의 큰 변화없이 고유주파수를 조절할 수 있음을 보고한 바 있다. Heun 등[2]은 선형압축기 피스톤의 운전형태에 따라 충전가스가 냉동기의 공진특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다. 또한 Hong 등[3]은 연결관의 크기가 냉동기의 성능 및 고유진동수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며 Park 등[4]은 냉동기 작동유체의 충전압력이 냉동기의 성능 및 고유주파수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 진동을 감쇄하기 위해 이동코일방식의 두 개의 피스톤이 서로 반대방향으로 왕복운동을 하는 선형압축기, 연결관, 재생기를 내장한 변위기, 팽창기 등으로 구성되고, 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용되는 소형 1W급 냉각능력의 FFPD(Free Piston Free Displacer) 방식 스테어링 냉동기용으로 설계, 제작되어진 선형 압축기의 운전 특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 선형압축기 고유주파수

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

따라서 선형 압축기의 운전 특성은 질량-스프링-감쇄 시스템으로 표현되는 식(1)의 힘평형 방정식과 식(2)의 인가전압 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_c x + (P - P_b) \cdot A = BII \quad (1)$$

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

여기서 m 은 피스톤의 질량, c 는 감쇄계수, k_c 는 스프링강성계수, x 는 피스톤의 행정거리, P 는 압축공간 압력, P_b 는 버퍼공간압력, A 는 실린더의 단면적, B 는 자속, l 은 코일길이, I 는 인가전류, V 는 전압, R 은 전기저항, L 은 인덕턴스를 각각 의미한다.

인가되는 전류 및 피스톤의 왕복운동 즉 행정거리 및 발생하는 압력 파형 사이에는 위상차 즉 시간지연

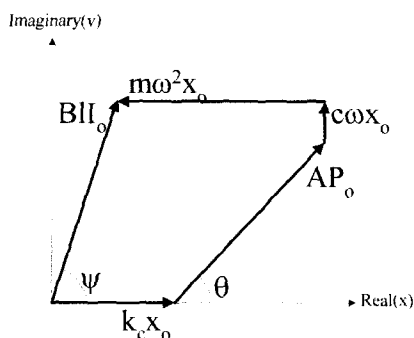


그림 2. 피스톤의 힘평형 선도
Fig. 2. Force diagram of piston

이 발생하며, 이를 정현파로 나타내면 피스톤의 행정거리 압력파형, 전류는 각각 식(3), (4), (5), (6)과 같다.

$$x = x_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$P = P_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$$P_b = P_{b0} \sin(\omega t + \theta_b) \quad (5)$$

$$I = I_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

식(3), (4), (6)을 식(1)에 대입하여 정리하면, 그림 2와 같은 힘평형선도를 얻을 수 있다. 이때 버퍼공간의 압력진폭(P_{b0})는 압축공간의 압력진폭(P_0)에 비해 매우 작아 식(5)는 고려하지 않았다.

그림 2는 주어진 피스톤 행정거리에서 선형압축기에 공급되는 전자기력을 최소화하기 위해서는 행정거리와 전자기력, 즉 전류의 위상차가 90° 가 되어야 함을 의미한다.

또한 일반적으로 자유피스톤형 선형압축기에서는 감쇄계수를 무시할 수 있어, 피스톤의 고유주파수(ω_n)는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_c + k_g}{m}} = \sqrt{\frac{k_c + P_0 A / x_0}{m}} \quad (7)$$

따라서 고유주파수는 코일스프링강성(k_c) 뿐만 아니라 발생하는 압력파형의 진폭(P_0)과 실린더 단면적의 곱에 비례하고, 피스톤 변위의 진폭(x_0)에 반비례하는 관계를 나타내어, 선형압축기의 고유주파수가 압축기의 운전특성에 따라 변화함을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

스테어링 냉동기의 선형압축기 운전특성을 구하기 위해 그림 3과 같은 실험장치를 구성하였다. 실험에 사용된 선형압축기는 1W급(냉각온도 80K) 냉동능력의 스테어링 냉동기용으로 설계, 제작된 이동코일형 선형압축기(실린더 직경 55 mm, 길이 120 mm)로, 내부에는 180° 의 위상차를 가지고 왕복운동을 하는 두 개의 피스톤과 피스톤에 구동력을 공급하는 코일 및 자석, 코일 지지대, 압축공간에서 생성된 압력 파형을 팽창기(직경 7 mm, 길이 70 mm)로 공급하는 연결관으로 구성되어 있으며, 선형 압축기 운전주파수와 정현파 입력전류, 전압의 공급 및 조절을 위해 Fujitz

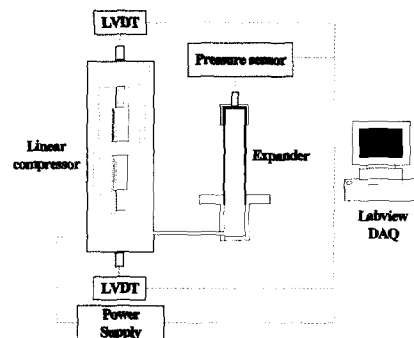


그림 3. 실험장치 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus

사의 교류전원 공급장치를 사용하였다.

한편 본 연구에서는 선형압축기 고유 운전특성의 파악을 위해 팽창기내에 변위기는 설치하지 않았다. 또한 선형 압축기 피스톤들의 행정거리를 측정하기 위해 선형가동차동변환기(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)를 두 개의 피스톤의 끝단에 각각 부착하였으며, 압력 파형을 측정하기 위해 팽창기의 상부에 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 입력전력을 구하였다.

실험은 선형 압축기에 인가되는 전자기력의 특성을 파악하기 위한 직류전원 공급 실험, 일정한 입력 전류 조건에서 15, 20, 25 kg/cm²G의 충전가스(GHe) 압력에 대한 선형압축기 특성 실험, 선형압축기가 고유주파수에서 운전될 때 인가전류의 변화에 대한 행정거리 특성을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 선형압축기 자기특성 및 코일스프링

선형압축기는 식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 전자기력에 의해 구동된다. 따라서 선형압축기의 운전특성을 파악하기 위해서는 전자기력특성 즉 자속(B)의 파악이 필수적이다. 그림 4는 직류전원 공급시 피스톤의 행정거리 변화이다. 선형 압축기에 직류전원을 공급하면 식(1)의 관성력, 마찰력이 제거되며, 실린더와 피스톤의 간극을 통해 누설이 발생하여 일정시간 경과 후에는 압력에 의한 작용력이 제거되어, 피스톤은 전자기력과 스프링에 의한 힘의 평형 위치에서 정지하게 된다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 두 개의 피스톤 (Piston I, II)은 압축시에는 거의 선형적인 특성을 나타내나 팽창시에는 다소 선형성이 떨어져 추력의 감소가 발생하는 결과를 나타내었다. 이는 팽창시 피스톤에 구동력을 제공하는 코일의 유효길이 즉 자기장 내에 위치하는 코일의 길이가 감소하기 때문으로 판단된다.

그림 5는 선형압축기의 설치방향에 따른 압축기 동작시 피스톤의 중립위치를 나타낸 그림이다. 선형압축기가 수평으로 설치되어 운전될 때 중립위치에 비해 수직위치에서 운전될 때 중립위치는 중력에 의한 영향으로 인하여 중력의 작용방향으로 약 0.5mm 정도 벗어나는 것으로 파악되었다. 이는 코일스프링의 특성을

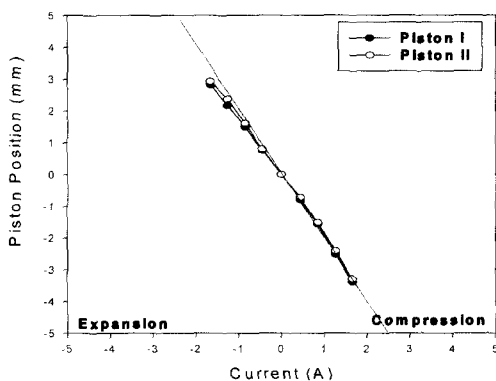


그림 4. 직류전원 공급시 피스톤의 위치
Fig. 4. Piston position with different applied DC current

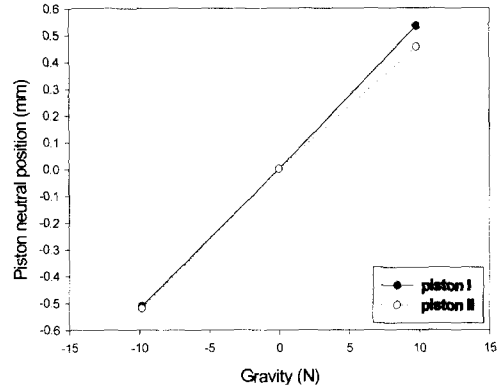


그림 5. 선형압축기 설치방향에 따른 피스톤 중립위치 변화
Fig. 5. The Neutral position of pistons

나타낸 것으로, 코일스프링의 강성(spring constant)의 선정은 고유주파수 측면 뿐만 아니라, 압축기의 설치방향 측면에 대해서도 고려되어야 함을 나타낸다.

4.2. 충전압력 및 운전주파수 특성

그림 6은 작동유체의 충전압력이 0 ~ 25 kg/cm²G까지 변화할 때 운전주파수 50Hz의 일정한 전류 즉 일정한 전자기력을 공급하였을 때, 측정된 고유주파수 및 피스톤 행정거리이다. 작동유체의 충전이 없는 경우, 즉 피스톤 양단의 압력차가 없는 경우의 고유주파수는 약 23 Hz, 충전압력 25 kg/cm²G의 경우 64 Hz로, 충전압력이 증가함에 따라 선형압축기

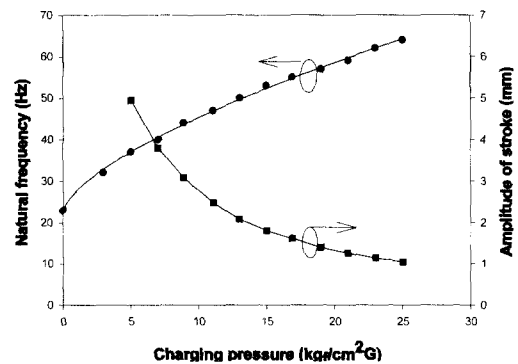


그림 6. 충전압력 변화에 따른 선형압축기 고유주파수 및 행정거리

Fig. 6. The natural frequency and amplitude of stroke with different charging pressure

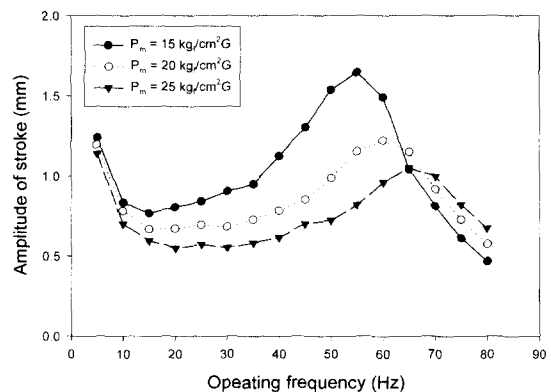


그림 7. 운전주파수변화에 따른 행정거리
Fig. 7. Amplitude of stroke with different operating frequency

의 고유주파수는 증가됨을 알 수 있다.

한편 피스톤의 행정거리는 충전압력이 증가함에 따라 감소하였다. 이는 피스톤의 운동에 의해 발생하는 피스톤 양단의 압력차가 충전압력이 증가하면서 증가하여, 행정거리의 감소를 유발하는 것으로 판단된다. 따라서 충전압력이 증가함에 따라 선형압축기의 고유주파수 및 피스톤의 행정거리는 코일스프링 및 마찰특성보다 피스톤의 운동으로 인해 발생하는 압력파형 즉 가스스프링에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

그림 7은 운전주파수의 변화에 따른 피스톤 행정거리이다. 피스톤의 행정거리는 0 ~ 10 Hz 주파수 영역에서는 주파수 증가시 감소하나, 10 Hz 이후에는 증가하였다. 한편 운전주파수가 고유주파수를 상회하면 피스톤의 행정거리는 급격히 감소되었다. 또한 선형압축기 운전주파수가 고유진동수보다 작은 영역에서는 충전압력 증가에 따라 가스스프링의 영향이 커져, 행정거리는 감소하나, 고유진동수보다 큰 운전주파수 영역에서는 더 크게 나타나는 특성을 나타내었다.

그림 8은 선형압축기 운전주파수에 따라 공급되는 전류와 피스톤 행정의 위상차(시간지연)이다. 식 (2)에서 알 수 있는 바와 같이 운전주파수가 선형압축기의 고유진동수에 근접하면 즉 공진(resonance)에 이르면, 이때 이론적인 전류와 피스톤 행정의 위상차는 90°가 된다. 그림 8의 위상차는 선형압축기의 고유진동수보다 작은 저주파수 작동영역에서는 비교적 완만한 위상변화율을 나타내나, 운전주파수가 공진영역에 도달하게 되면 급격한 변화율이 나타났으며, 저주파수 영역에서는 충전압력 변화에 의한 영향이 나타나지 않으나, 고주파수의 작동영역에서는 충전압력이 클수록 작은 위상차가 발생하였다.

그림 9는 일정한 전류를 공급할 때 선형압축기에 인가되는 전압을 나타낸 그림으로, 충전압력에 관계없이 공진영역의 운전주파수에서 최대의 인가전압이 발생함을 알 수 있다. 이는 공진영역에서는 선형압축기 피스톤의 행정거리가 증가하고, 식(2)에서 알 수 있는 바와 같이 이로 인해 인가전압의 증가가 발생하는 것으로 판단된다.

그림 10은 충전압력이 15, 20, 25 kg/cm²G인 경우, 선형 압축기의 행정거리에 따라 발생된 압력 파형의 진폭을 나타낸 그림이다. 선형압축기에서 발생하는 압력 파형은 행정거리가 증가할수록 커지는 경향을 나타내고 있다. 또한 충전 압력이 증가할수록, 피스톤의 왕복운동으로 발생된 압력 파형의 진폭이 증가함을 알 수 있다.

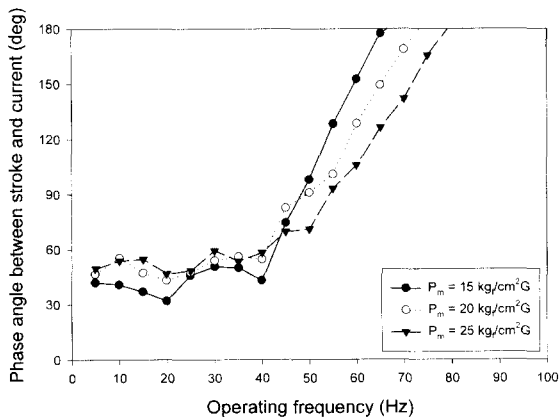


그림 8. 피스톤 행정과 인가전류의 위상차
Fig. 8. Phase angle between stroke and current with different operating frequency

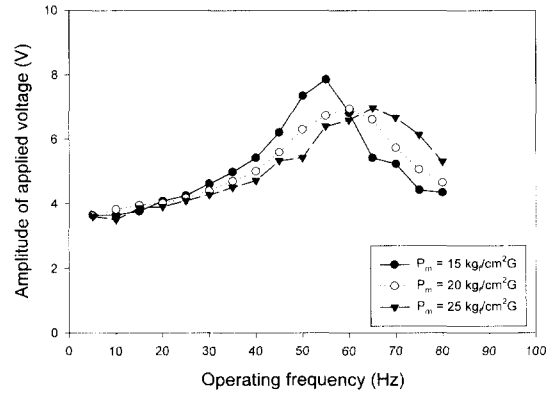


그림 9. 운전주파수에 따른 인가전압
Fig. 9. Applied voltage

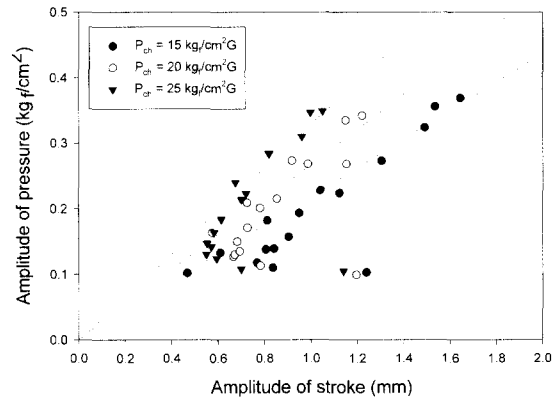


그림 10. 압력진폭
Fig. 10. The amplitude of pressure

그림 11은 충전압력 15 kg/cm²G의 경우, 운전주파수에 따라 피스톤의 행정거리를 생성하기 위해 필요한 힘(BII₀)을 나타낸 그림이다. 동일한 운전주파수에서 행정거리와 힘은 비례적인 관계를 나타내었고, 운전주파수가 20Hz에서 50Hz로 증가할때 동일한 행정거리를 생성하기 위해 필요한 힘은 줄어드나, 50Hz 이상의 운전주파수 영역에서는 주파수가 증가할수록 힘은 증가하여, 저주파수의 영역에서보다 더 큰 힘이 요구됨을 나타내고 있다.

따라서 운전주파수가 선형압축기의 고유주파수에 근접할때 압축기의 구동력이 최소화됨을 알 수 있으며,

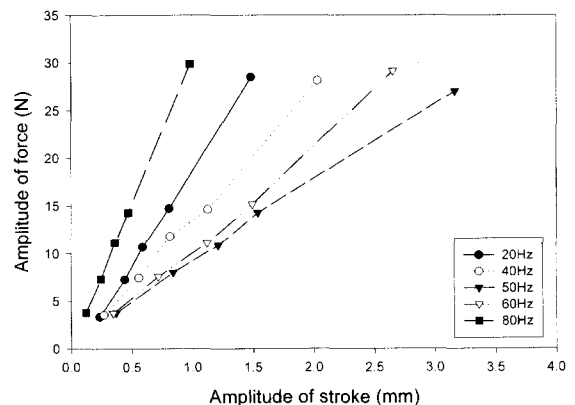


그림 11. 선형압축기 피스톤의 추력특성
Fig. 11. The amplitude of force

이때 압축기로 공급되는 입력전력이 최소화될 수 있을
을 알 수 있다.

4.3. 공진특성

그림 12는 선형압축기를 고유주파수로 운전할 때
입력전류의 변화에 따른 피스톤의 행정거리를 나타낸
그림이다. 피스톤의 행정거리는 입력전류가 증가하면,
즉 구동력인 전자기력이 증가하면, 증가되는 경향을
나타내었다. 그림 13은 일정한 충전압력에서 그림 3
의 팽창기를 제거하고 연결관만을 부착한 상태에서 선
형압축기가 운전할 때 체적변화에 따른 압축기의 고유
주파수 특성이다.

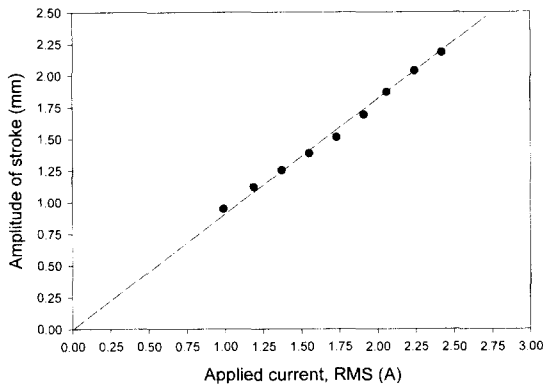


그림 12. 고유주파수 운전시의 행정거리 특성
Fig. 12. The amplitude of stroke at the
natural frequency

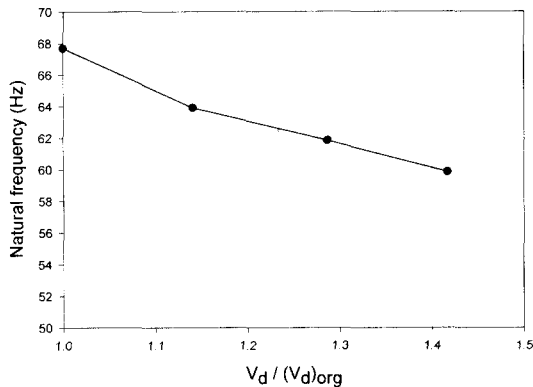


그림 13. 압축공간의 변화에 따른 고유주파수
Fig. 13. The natural frequency with different
dead volume

선형압축기의 고유주파수는 압축공간이 증가함에 따
라 감소하고, 이는 압축공간이 증가하여 선형압축기의
압축비가 감소하고, 행정거리는 증가하여 가스스프링
의 영향이 감소하기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 주로 적외선 센서의 냉각용으로 사용
되어지는 소형 FPFDF(Free Piston, Free
Displacer) 방식 스테링 냉동기의 이동코일(moving
coil) 방식 선형압축기 운전특성을 실험적으로 고찰하
여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 작동유체의 충전압력이 증가하면 선형압축기의
고유주파수는 증가되며, 이때 행정거리는 감소한다.
- (2) 작동유체의 충전압력이 증가하면 실린더 내 피
스톤의 왕복운동으로 발생하는 압력 파형의 진폭은 증
가한다.
- (3) 압축기 고유주파수 운전시 입력전류가 증가하
면 피스톤 행정거리가 증가한다.
- (4) 선형압축기의 압축체적이 증가하면 고유주파수
는 감소한다.
- (5) 고유주파수보다 큰 운전주파수영역에서 운전주
파수가 커짐에 따라 공급전류와 발생하는 피스톤의 행
정거리의 위상차(시간지연)는 증가한다.
- (6) 선형압축기의 행정거리는 고유주파수에서 운전
될 때 최대의 값을 나타내며, 이때 공급전류와 발생되
는 피스톤의 행정거리의 위상차는 90° 이다.
- (7) 선형압축기가 압축기의 고유주파수에서 운전될
때 최소의 구동력이 요구된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1]S. W. K. Yuan, L. G. Naes and T. C.
Nast, "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, S. A. Collins, D. L. Johnson,
and R. G. Ross Jr., "Investigation of Gas
Effects on Cryocooler Resonance
Characteristics", Cryocoolers 9, pp. 421 -
430, 1997
- [3]Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Deuk-Yong
Koh, Hyo-Bong Kim, Koon-Sup Oh and
Jong-Hak Kim, "Study of Stirling
Cryocooler Performance with different
length of split tube", Proceedings, KIASC
Conference 2001, Mooju, pp. 37-40, 2001
- [4]S. J. Park, Y. J. Hong, D. Y. Koh, K. S.
Oh, H. K. Yeom and J. H. Kim, " Study of
KIMM-E1 Stirling Cryocooler Performance
with different Charging Pressure",
Proceedings, KIASC Conference 2001,
Mooju, pp. 33-36, 2001

저 자 소 개



홍용주(洪溶柱)
1968년 03월 19일생, 1990년 고려대
공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대
학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재
한국기계연구원 선임연구원



박성제 (朴聖濟)

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



김효봉 (金孝烽)

1960년 04월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 현재 충남대 공대 기계공학과 석사과정, 현재 한국기계연구원 주임기술원



고득용 (高得龍)

1959년 02월 12일생, 1982년 한양대 공대 기계공학과 졸업, 1985년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원



김종학 (金鍾鶴)

1971년 03월 22일생, 1997년 성균관대 공대 기계설계학과 졸업, 1999년 동 대학원 기계설계학과 졸업(공학석사), 현재 우영 기술연구원 대리



유명진 (柳炳健)

1947년 03월 28일생, 1971년 서울대 공대 조선공학과 졸업, 1975년 McGill University 공학석사, 1979년 University of California, Berkely 공학박사, 현재 (주)우영 부사장