

극저온 스테링 냉동기용 선형압축기 개발

강경태* · 강희석** · 지상우**

1. 서 론

극저온에서는 초전도 현상 및 열잡음 감소등의 현상을 확인할 수 있다. 이러한 극저온상태의 특성을 장시간 유지하기 위해서 여러 종류의 냉동기가 연구 개발되고 있다. 극저온 스테링 냉동기(Stirling cryocooler)는 주로 수 와트(watt)정도의 냉동능력이 필요한 적외선 카메라(infrared camera)용 냉각기로 사용된다.¹⁾

극저온 냉동기의 응용범위로서는 야간투시경 및 미사일 유도를 위한 적외선 센서의 냉각 등의 군사용 용의에도 의료용 MRI나 에너지변환(MHD, 핵융합, 초전도발전기) 분야에서도 응용되어 실용화 되었다. 또한 앞으로는 이동통신 무선기지국용 초전도 필터(filter)등의 냉각용으로도 넓게 활용될 것으로 예측되고 있다.

현재 선진국을 중심으로 여러 연구기관에서 극저온 냉동기를 개발하여 실용화 하였으나, 국내에서는 극저온 냉동기를 전량 고가로 구입하고 있는 상황으로 현재 국산화 연구가 한국생산기술연구원을 비롯한 여러 업체와 연구소에서 진행중이다.

극저온 냉동기는 크게 재생형(regenerative) 열교환기를 사용하는 재생형 극저온 냉동기와 향류형(recuperative)

열교환기를 사용하는 향류형 극저온냉동기로 구분된다. 또한 사이클의 열역학적 구성에 따라서 스테링(stirling) 냉동기, 맥동관(Pulse tube) 냉동기, GM(Gifford-McMahon)냉동기, 흡착(Scorption)냉동기, JT(Joule-Thomson) 냉동기등으로 구분된다.

Fig. 2는 일반적인 극저온 스테링냉동기의 개요도를 나타내고 있다.

현재는 구조적으로 신뢰성이 높은 장점을 지닌 맥동관 냉동기에 대해 많은 연구도 진행되고 있으나, 소형으로서 경량 및 충분한 내구성등의 조건을 만족하는 냉동기로서는 Stirling 냉동기가 가장 적합한 것으로 판단된다. 기계식 압축방식으로는 왕복동식, 회전식, 원심식 여러 종류의 압축기가 있으나, 제작이 어렵지 않고 신뢰성이 우수한 선형압축기(linear compressor)가 많이 채택되어 사용되어 지고 있다. 전자석을 내부에 배치한 선형압축기에 대한 설계 연구는 우수한 제어기법들이 적용되어 그 성능이 발전하고 있는 상황이다.

2. 성능예측

스테링 냉동기 내부의 해석 및 설계방법은 매우 까

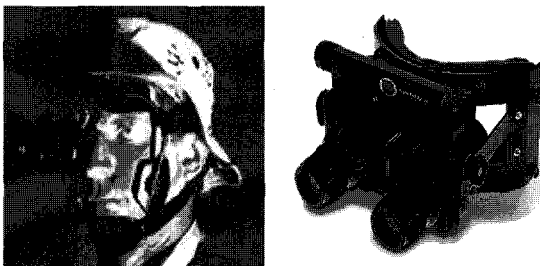


Fig. 1 Application field of stirling cryocooler

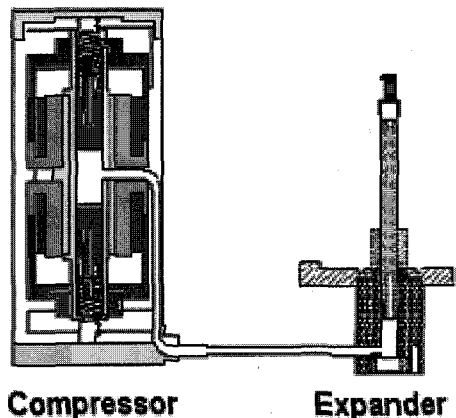


Fig. 2 Schematic diagram of stirling cryocooler

* 한국생산기술연구원 냉동공조연구팀
E-mail : kt kang@kitech.re.kr

** 한국생산기술연구원 첨단생산설비연구팀
E-mail : hskang@kitech.re.kr/fok@kitech.re.kr

다로우며 최선의 방법이 알려져 있지 않다. 각 제조 회사별로 이론적 해석방법을 바탕으로 하여 실험적인 방법으로 최적 설계를 한다. 압축기에서는 극저온냉각에 필요한 압력차이를 발생시키기 위해서 압축 작용을 반복하게 되며, 팽창기에서는 팽창 작용에 따라 온도가 감소하여 냉각효과를 나타내게 된다.

작동유체(working fluid)가 재생기(regenerator)를 거치는 동안 고압의 가스는 통로가 매우 작은곳(벨브, Orifice, Porous plug)등을 지나면서 온도 강하가 생기는 J-T(Joule-Thomson)효과가 일어나게 된다. 이것은 내부일(internal work)의 가스를 냉각하는데 사용되는 것으로 가스가 팽창할 때 분자들을 격리시키기 때문인 것으로 설명되어진다.

이러한 과정에서 내부 작동 압력의 예측은 매우 중요한 사항이다. 스테링 냉동기용 선형 압축기의 가장 중요한 사항은 초기 주입한 압력과 냉동기 내부의 압력의 변화이다. 이 사이클에 따라 팽창부에서 열을 흡수하여 냉각성능을 구현할 수 있다.

효율적인 냉동기를 제작하기 위해 냉각기능을 수행하는 팽창부와 냉매를 압축 팽창시키는 압축기 내부의 최대 최소 작동압력에 대한 예측이 필요하다. 이러한 스테링 사이클에 대한 압력해석은 SETMA²⁾를 통하여 가능하며, Matlab으로 자체 제작한 프로그램으로도 Fig. 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 3에서 보듯이, Matlab으로 작성한 프로그램의 결과는 최소 압력에 비교하여 최대 압력이 약 4배 정도의 차이가 있다. 그러나 SETMA로 초기주입 20기압으로 해석한 결과인 Fig. 4와 비교하여 약 3배 정도의

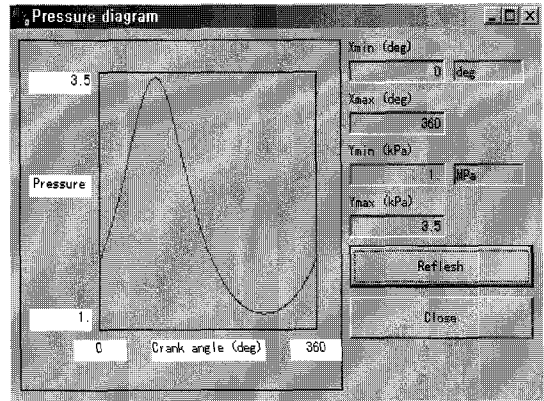


Fig. 4 Pressure change prediction by SETMA

차이가 있음을 확인 할 수 있었다. 이런 약간의 차이가 있는 것은 SETMA에서는 가열기(heater), 재생기(regenerator), 냉각기(cooler)의 세 부분 외에도 왕복기(displacer)의 체적을 고려하였기 때문에 팽창부의 부피가 커지는 효과가 있기 때문에 최대 압력이 약간 적게 나타나는 것으로 추측된다. 충전압력에 따른 수행하는 일의 변화를 확인하기 위해 충전압력을 20기압, 30기압, 40기압으로 한 결과가 Fig. 5에 나타나있다.

극저온 스테링 냉동기의 작동유체(working fluid)로서는 헬륨(helium)을 주로 이용한다. 헬륨은 끓는점이 -268.9℃로서 극저온을 얻기에 적합하며 기체로서는 1 원자분자로 되어 있고, 이상기체에 가깝다. 화학적 성질은 매우 비활성이며, 대부분의 다른 원소와 반응하지 않는다. 극저온 상태로서의 액체 헬륨은 초유동(超流動)과 같은 특이한 성질을 나타낸다. 헬륨은 비체적이

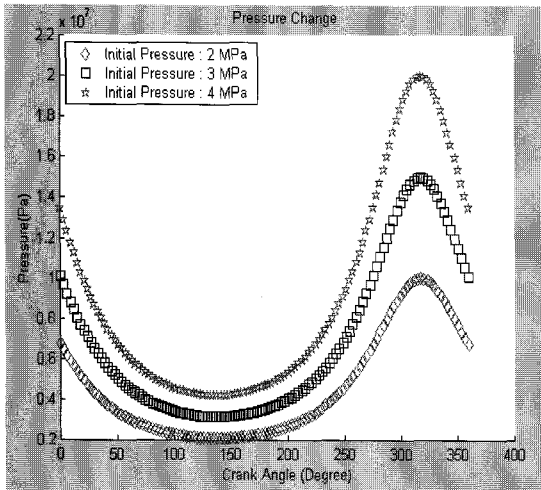


Fig. 3 Pressure change prediction by Matlab

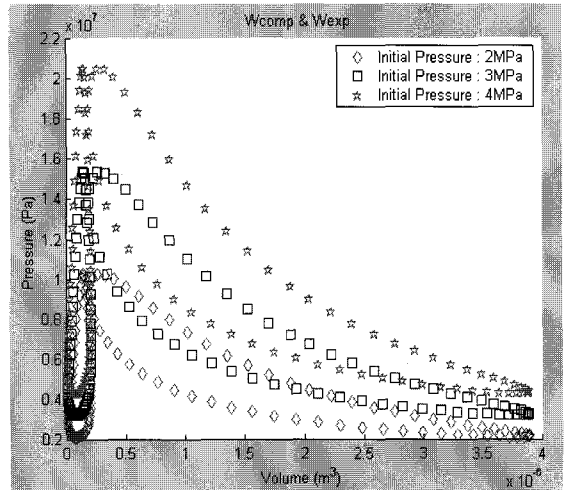


Fig. 5 Work change by the initial pressure

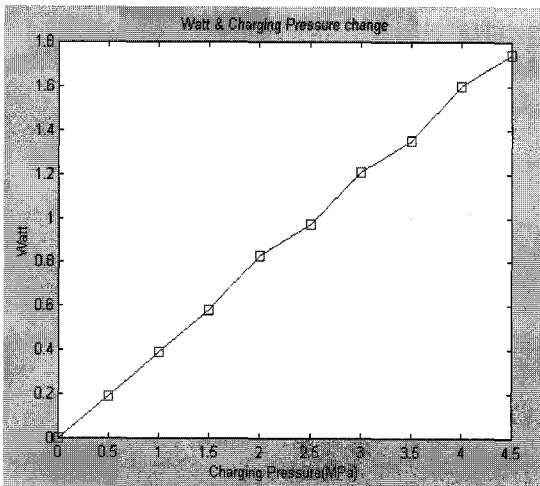


Fig. 6 Work and the input pressure relation graph

작고 압력이 높은 냉매의 특징을 갖고있어 왕복동압축기에 널리 이용된다.

Fig. 6은 헬륨을 냉매로 주입하여 충전 압력을 변화시켜가면서 스테링 극저온 냉동기가 수행하는 냉동성능을 SETMA 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 결과이다.

예를 들어 1W정도의 냉동성능을 지닌 냉동기를 원할 경우 약 2.5MPa의 헬륨을 주입하는 것이 적당하다는 것을 시뮬레이션을 통해 알 수 있다.

Fig. 6의 결과를 이용하여 냉동성능을 헬륨 냉매의 초기 주입압력에 의해 추측할 수 있으므로 이것은 실제 냉매를 압축기에 충전할 때 매우 중요한 자료가 될 수 있다.

충진압력외에도 실제 극저온 스테링 냉동기의 성능 및 선형 압축기의 작동에 있어서는 인가전압(voltage)이나 주파수(frequency)에 대한 영향도 냉동성능에 영향을 미치지만 다른 여러 인자에 비하여 충전압력은 냉동기의 성능 및 선형압축기의 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다.

3. 선형압축기의 설계

스테링 극저온 냉동기용 선형압축기는 왕복구동의 특징으로서 회전식 기계구동방식에 비해 반경방향으로의 힘이 적게 가해지므로 내구성이 강해지는 특징이 있으며, 장시간의 운전에 대해서도 신뢰성이 뛰어나다.

왕복구동을 구현하기 위해 영구자석(permanent magnet)에 대해서 전류가 인가된 코일(coil)의 반발력을 이용

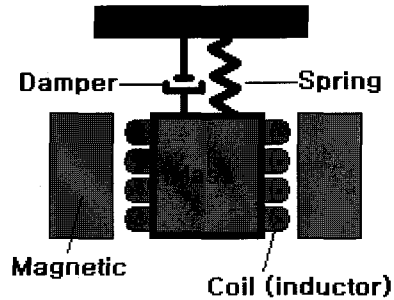


Fig. 7 Schematic linear compressor model

하여 선형운동을 구현한다. 구동방법에 따라 자석부가 왕복 운동을 하는 자석왕복형식(moving magnet type)과 자석은 고정되어있고 코일부가 왕복운동을하는 코일왕복형식(moving coil type)이 있다. 자석왕복형식은 코일왕복형식에 비하여 설계조건이 까다로우며 왕복운동부가 자석의 자체 중량으로 무거워지는 단점이 있다. 현재는 기술적 난이도가 낮으며 생산이 용이한 코일왕복형식 선형압축기가 많이 적용되고 있다.

Fig. 7은 선형압축기를 코일이 자석에 의한 질량 진동시스템으로 모델링을 한 것이다.

실제 선형압축기에 있어서는 코일이 바깥쪽에 배치되어있고, 자석이 안쪽에 배치되어 완전한 솔레노이드(Solenoid) 형태를 구성하고 있으나, 모델링과정에서 간단히 하기위하여 간략화 하였다. 위 모델의 운동방정식은 뉴턴의 운동방정식에 의해 아래 식 (1)과 같이 유도된다.

$$F = mx'' + bx' + kx + \Delta PA = 2\pi nrBi = Ti \quad (1)$$

여기서, m은 질량(kg), b는 점성감쇠계수(Nm/s), k는 스프링상수(N/m), ΔP 는 압축기내부의 상부와 하부의 압력차이, A는 압축기 내부 작동 피스톤의 단면적, n은 솔레노이드에 감긴 코일의 감긴 횟수, r은 코일의 반경(m), B는 자속밀도(Tesla), T는 transducer 상수, i는 전류(A)이다.

여기서, L은 코일의 인덕턴스(inductance)값으로서 솔레노이드의 경우 식 (2)에 의하여 값을 갖게된다. 여기서 N은 감긴 횟수, μ_0 는 투자율(permeability)로서, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$ 이다. A는 솔레노이드의 면적(m^2)이다.

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \quad (2)$$

선형압축기는 공급되는 전압과 코일에 인가되는 전류가 실제 작동에 큰 영향을 미치게 된다. 공급되는 전압의 크기가 작을수록 더 효율이 좋은 압축기를 설계할 수 있다. 그러하기 위해선 시스템의 성능을 나타내 주는 전달함수((transfer function)를 구하여 그 성능을 예측할 수 있다.

선형압축기로부터 얻을 수 있는 신호는 입력전압, 전류 및 실제 작동시 코일과 인덕턴스의 작동으로 인하여 변화하게 되는 전압과 전류가 있고 선형압축기 내부의 피스톤의 변위를 입력 전압에 관한 출력으로 보는 관계를 유추할 수 있다.

공급되는 전압과 실제 작동하면서 변환 전류의 관계는 코일의 인덕턴스와 트랜듀서 상수 T로 표현되는 자속밀도의에도 여러 영향이 미칠 수 있으므로, 전달함수를 구하여 그 영향을 알아보는 방법을 선택하였다.

공급되는 전압은 식 (1)에서 정의된 트랜듀서 상수 T에 관해서 식 (3)과 같이 속도와와의 곱으로 표현할 수 있고, 전류가 가해질 때 자속밀도의 곱으로 발생하는 힘 F는 식 (4)와 같이 T와 전류의 곱으로 정리가 된다.

$$e = Tv \tag{3}$$

$$-TI = F \tag{4}$$

식 (4)를 바탕으로 전압과 속도 및 인덕턴스의 관계를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$e = Tx' + L \frac{di}{dt} \tag{5}$$

$$e' = Tx'' + L \frac{d^2i}{dt^2} \tag{6}$$

속도와 가속도의 식으로 정리하면 아래와 같다.

$$x' = \frac{1}{T} (e - L \frac{di}{dt}) \tag{7}$$

$$x'' = \frac{1}{T} (e' - L \frac{d^2i}{dt^2}) \tag{8}$$

식 (7), (8)을 식 (1)의 운동방정식에 대입하면, 전압과 전류를 얻는 관계식을 얻을 수 있으며 결과 아래와 같다.

$$m \left(e' - L \frac{d^2i}{dt^2} \right) + b \left(e - L \frac{di}{dt} \right) + k \left(\int e - L \frac{di}{dt} \right) = T^2 i \tag{9}$$

위 식 (9)를 Laplace 변환을 하면 식 (10)과 같이된다.

$$m \{ ES - L(S^2 I - S i_{(0)} - i'_{(0)}) \} + b \{ E - L(SI - i'_{(0)}) \} + k \left\{ \frac{E}{S} + L(SI - i'_{(0)}) \right\} = T^2 I \tag{10}$$

초기조건 $i'_{(0)} = 0, i_{(0)} = 0$ 일 때, 식 (10)은 다음과 같이 간단히 정리가 된다.

$$mES - mLI S^2 + bE - bLIS + k \frac{E}{S} - kLI = T^2 I \tag{11}$$

식 (11)을 정리하면, 입력 전압에 대한 전류의 관계를 나타내는 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{I(s)}{E(s)} = \frac{m s^2 + bs + k}{mL s^3 + bL s^2 + kLs - T^2} \tag{12}$$

식 (12)를 이용하여 입력되는 전압과 출력되는 전류의 관계를 추측할 수 있다. 위의 시뮬레이션을 위해서 Matlab의 Simulink³⁾를 사용하였으며 각 요인의 물성치를 각 Simulink box안에 대입하여 관계를 추정하였다.

Fig. 8에 나타낸 Simulink의 모델의 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 고유진동수라 추측되는 40~65Hz 사이의 주파수를 변화해가며 측정한 실제 전류와 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다.

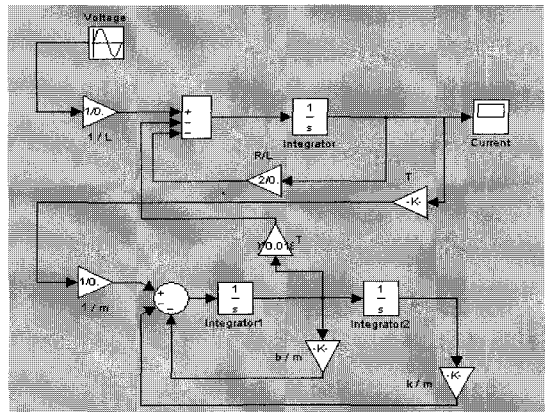


Fig. 8 Simulink model of a linear compressor system

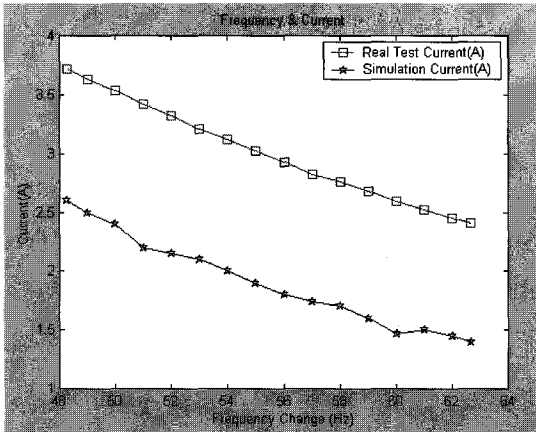


Fig. 9 Test & simulation output current

실험 결과가 시뮬레이션의 값보다 크게 나타났는데 이것은 모델링에 있어서 인덕터(inductor)의 값이 크게 계산되었기 때문으로 추정된다. 실제 진동계 시스템으로서 큰 영향을 주는 질량, 점성감쇠계수, 스프링 상수등은 실제 전류의 출력에는 거의 영향을 미치지 못하였다. 또한, 자속밀도도 그리 큰 영향을 주지 않았으며, 주파수와 인덕턴스가 전류의 출력과 가장 중요한 역할을 한다는 것을 추정할 수 있었다. 이것은 인덕턴스의 값이 크면 전류의 변화, 즉 전류의 값도 작아지는 인덕턴스의 저항적 성질인 임피던스(impedance)가 있기 때문이다.

Fig 10은 전압을 교류전압 10 Volt를 인가하였을 때 실제 작동 후 나타나는 전압을 나타낸 것이다. 주파수가 높아질수록 전압은 감소하는 경향을 보였는데, 이것은 고주파수로 갈수록 저항의 값을 갖는 유도리액턴스(inductive reactance)가 증가하기 때문으로 추정된다.

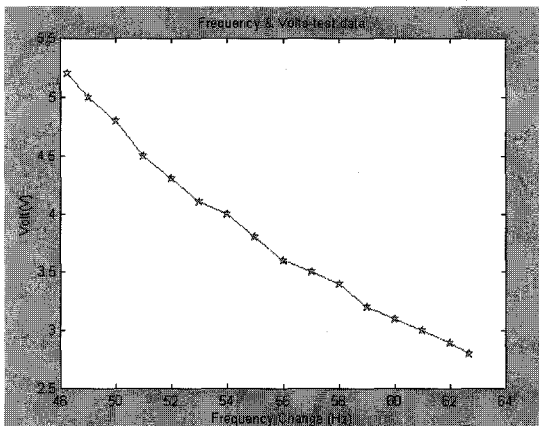


Fig. 10 Voltage change by a frequency change

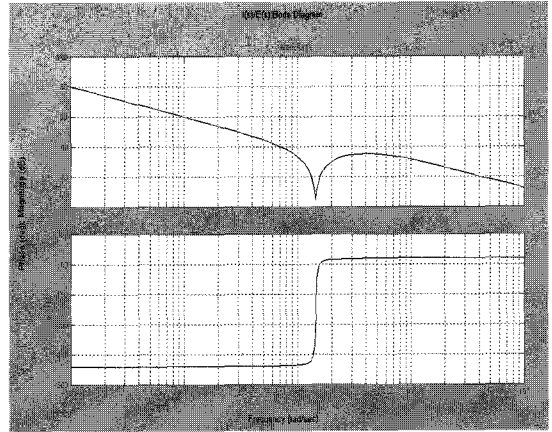


Fig. 11 Bode diagram of a linear compressor system

Fig. 11은 시스템의 주어지는 주파수의 변화에 따른 출력크기(magnitude)와 위상(phase)차이를 나타낸 보드선도(bode diagram)이다. 보드선도를 검토하여 보면 약 110 Hz 정도가 코너 주파수(corner frequency)로서 출력과 위상에 있어서 급격한 변화가 있으며, 실제로 Simulink의 출력 결과 그래프도 약 100 Hz 부근에서 출력 전류가 0으로 수렴하는 현상을 나타내었다. 이것은 100 Hz 정도가 시스템의 공진(resonance) 상태임을 나타내는 현상이지만, 이것은 인덕턴스가 크게 설정된 시뮬레이션의 결과 Fig. 9를 바탕으로 볼 때 실제 시스템의 공진주파수는 이보다 낮을 것으로 추측이 된다.

전기적으로 공진점을 찾아내는 방법에 있어서 인덕턴스의 값이 매우 중요한 것을 알 수 있었다.

일반적으로 선형압축기는 소모 동력의 최소화를 위해서 공진점의 주파수를 갖고 운전을 하므로, 위의 전압 전류의 추정 방법외에도 간단히 고유진동수의 공식에서 충전기압에 관한 부분을 가정하여 구할 수 있다.

$$W_m = \sqrt{\frac{K_c + K_g}{m}} = \sqrt{\frac{K_c + P_0 A/x}{m}} \quad (13)$$

여기서 K_c 는 압축기의 스프링 상수 K_g 는 압축기 내부에 충전하는 헬륨가스 때문인 가스스프링 상수, P_0 는 선형압축기의 충전압력, A 는 압축기 피스톤의 단면적, x 는 피스톤의 행정거리이다.

Fig. 11은 충전압력을 0~4.5MPa까지 충전하면서 고유진동수의 변화를 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 통해 충전압력이 약 2.5MPa인 조건일 때 약 70Hz의 고유진동수를 나타내는 것을 추정할 수 있다.

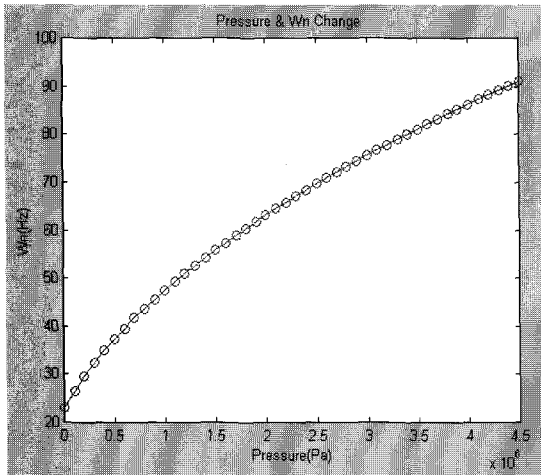


Fig. 12 Natural frequency by a charging pressure

4. 결 론

극저온 스테링 냉동기용 선형압축기는 일반 압축기와 다른 여러 특징을 갖고있음을 살펴보았다. 압축기가 실제 작동시 어느 정도의 충전 압력이 필요하며 냉동 성능이 실제로 수행되는지 SETMA와 Matlab을 이용하여 예측하였다. 결과를 바탕으로 볼 때, 약 1W내외의 냉동능력을 위해서는 2.5MPa 내외의 헬륨냉매의 주입이 필요한 것으로 분석되었다.

선형압축기의 보다 효율적인 운전을 위해서 공진주파수에서 작동하도록 하는 설계방법을 소개하였다. 전압과 전류의 변화를 이용한 공진주파수 추정 방법은 인덕턴스의 매우 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

실제 실험과 시뮬레이션한 결과의 차이가 있는데 이것은 모델링을 할때 솔레노이드의 형상을 명확히 파악하여 보다 정확한 인덕턴스값을 구하여야 할 것으로 생각된다. 전력의 소비를 줄이기 위해서 전류의 출력이 작아지는 보드전도의 그림으로부터 공진주파수를 추정할 수 있었다. 또한 충전압력에 따른 스프링 상수 변화와 고유진동수 변화를 추정할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Noboru Kagawa, 1998, "Analytical Method for Stirling Engines and Coolers," Int'l J. of JSME, Vol. 41, No. 3.
- (2) Allan J. Organ, 1999, "The miniature, reversed Stirling cycle cryo-cooler : integrated simulation of performance," Cryogenics, p. 253.
- (3) Yee-Pen Yang, Bin-Juine Huang, 1998, "Fuzzy control on the phase and stroke of a linear compressor," Cryogenics, p. 231.
- (4) Y. J. Hong, S. J. Park, D. Y. Koh, and K. S. Oh, 2000, "A simple analysis of split-type free piston and free displacer Stirling cryocooler," Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, p. 22.
- (5) D. M. Berchowitz, 1998, "Maximized performance of Stirling cycle refrigerators," IIF-IIR Sections B and E, Oslo, Norway.
- (6) 김영인, 장호명, 1990, "극저온 냉동기(II)," 공기조화 냉동공학회지, 제19권, 제1호, pp. 7~12.
- (7) 이금배, 백일현, 1989, "SQUID 냉각장치용 극저온 시스템 개발", 공기조화 냉동공학회지 제18권, 제2호, pp. 121~129.
- (8) 박성제, 홍용주, 고득용, 김효봉, 오군섭, 엄한길, 김종학, 2001, "충진압력에 따른 KIMM-EI 스테링극저온 냉동기에 관한 연구", 한국 초전도 저온공학회 학술대회 논문집, pp. 33~36.
- 1) <http://www.litton.com/products/>제품 홍보자료 인용
- 2) SETMA : Stirling Engine Thermodynamic and Mechanical Analysis, 山下 登, 平田宏一, 香川 登, 百瀬 豊이 제공하는 Stirling cycle 해석 프로그램, "スターリング エンジンの理論と設計"에 수록, 山海堂 出版社.
- 3) <http://www.mathworks.com/products/simulink/> Mathworks사에서 개발한 시뮬레이션 전문 프로그램