

스터링 극저온 냉동기 성능의 운전주파수 의존성에 관한 연구

Study of the Dependency of the Stirling Cryocooler's Thermodynamic Performance on the Operating Frequency

홍용주*, 박성제*, 김효봉*, 유병건**, 최영돈***

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

Abstract: A free piston and free displacer (FPFD) Stirling cryocooler has been widely used for the cooling infrared and cryo-sensor. The thermodynamic performance of the free piston and free displacer type (FPFD) Stirling cryocooler is highly dependent on the operating frequency of the linear compressor and the natural frequency of the displacer. In this study, to find optimal relation between operating and natural frequency of the displacer, the dynamic characteristics of the displacer in the expansion space of the Stirling cooler was investigated by experiment.

The experimental results show that the Stirling cryocooler has maximum cooling capacity at the operating frequency of about 0.8 times of the natural frequency of displacer. Therefore the operating frequency of the Stirling cryocooler should be determined by natural frequency of the linear compressor and displacer.

Key Words: Stirling cryocooler, displacer, operating frequency, dynamic characteristics

1. 서 론

최근에 적외선 센서 및 고온 초전도체 등의 저온센서 냉각과 관련하여 액체질소 온도(77K) 부근의 냉각장치 수요가 급증하고 있다. 이러한 응용분야에서 요구되는 극저온 발생장치는 (1)냉각온도, (2)냉동부하, (3)신뢰성, (4)진동수준, (5)온도제어성, (6) 설정온도 도달시간 및 전력입력, (7)체적, 중량, (8)설치 환경 및 비용 등의 관점에서 충분한 검토가 필요하다. [1] 저온센서용 냉각온도인 77K 이하 극저온 발생장치로 주로 사용되어지는 냉동기로는 스텔링(Stirling) 냉동기, G-M (Gifford-MaMahon) 극저온냉동기, Joule-Thomson 극저온냉동기 및 맥동관(pulse tube) 극저온냉동기 등이 있으며, 압축기와 냉각부를 연결하는 밸브의 유무에 따라 G-M 극저온냉동기, G-M형 맥동관 극저온냉동기 등의 G-M형과,

스터링 냉동기, 스텔링형 맥동관 냉동기 등의 스텔링형으로 분류되며, G-M형의 냉동기의 경우 약 1Hz 부근의 운전주파수를, 스텔링형 냉동기의 경우 수십 Hz의 운전주파수로 구동된다.

선형압축기형 스텔링 냉동기는 다른 냉동기에 비해 저진동, 낮은 소요동력, 소형, 경량, 충분한 내구성 및 수명(MTTF, Mean Time To Failure) 등의 장점이 있고, 맥동관 냉동기 등에서 발생하는 설치방향에 따른 냉동능력의 저하도 발생하지 않아, 주로 적외선 센서의 냉각용으로 활용되고 있다.

박성제 등[2]은 FPFD(Free Piston and Free Diaplayer)방식의 선형압축기형 스텔링 냉동기에서 운전주파수의 변화에 따른 스텔링 냉동기의 냉동능력을 측정하여, 코일스프링의 강성 뿐만 아니라 가스스프링의 강성이 공진주파수에 영향을 미치며, 공진주파수로 운전될 때 최대의 냉동능력이 발생하고, 운전주파수는 변위기(displacer)의 고유진동수와 일정한 상관관계가 있음을 제시하였다. 홍용주 등[3]은 스텔링 냉동기용 선형압축기의 충전압력 및 운전주파수의 변화에 따른 선형압축기 성능특성에 대한 실험을 수행하여, 최적의 운전주파수는 충전압력에 따라 변화하며, 선형압축기의 고유주파수에서 운전될 때 최소의 입력전력이 요구됨을 제시하였다. 한편 Jonge [4]는 스텔링 냉동기에 대한 이론적 연구를 통해 강제구동형 변위기에서 압축기와 변위기 피스톤의 위상차가 90도일 때 최대의 냉동능력이 발생하나, 자유피스톤형 변위기의 경우 45도의 위상차에서 최대의 냉동능력이 발생함을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 이와 같이 운전주파수의 변화에 따라 발생하는 선형압축기형 스텔링 냉동기의 성능특성변화를 규명하고자, 냉동기 충전압력 및 스텔링 냉동기의 변위기의 동특성 변화에 따른 냉동특성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 본 론

FPFD 스텔링 냉동기의 개략도는 Fig. 1과 같다. FPFD 스텔링 냉동기는 크게 선형 압축기 즉 압축부와 팽창부로 구분되어 있으며, 압축부는 실린더, 서로 반대 방향으로 구동되는 두 개의 피스톤, 코일과 자석 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 변위기와 그 내부의 재생기(regenerator), 변위기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다.

피스톤은 코일구동방식(moving coil type) 또는 자석 구동 방식(moving magnet type)으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되고, 이 피스톤의 구동에 의해 발생된 압력파형은 연결관(split tube)을 통해 연결된 팽창기내의 변위기 및 팽창부로 전파된다.

* 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

** 정 회 원 : (주)우영

*** 비 회 원 : 고려대학교 기계공학과

원고접수 : 2002년 03월 30일

심사완료 : 2002년 05월 10일

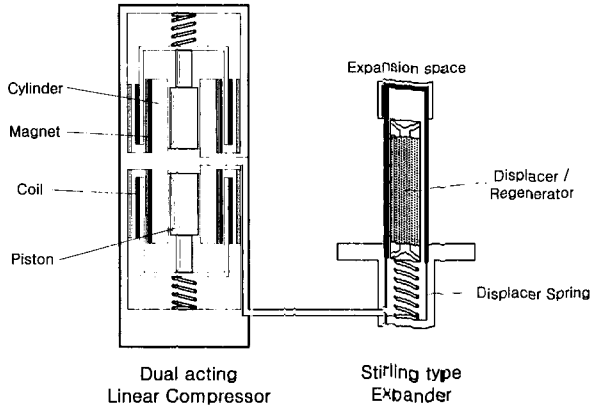


그림 1. 자유피스톤형 스테링 냉동기
Fig. 1. The FPPD type Stirling refrigerator

한편 냉동은 팽창공간에 연결된 저온부에서 발생하고, 변위기는 피스톤 사이의 공간, 연결관(split tube)내 공간과 팽창기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간과 팽창기의 저온부 공간의 압력차에 의해 구동된다. 이와 같은 변위기의 동특성은 변위기의 질량(m_d), 마찰계수(c_d), 스프링상수(k_d) 및 재생기를 통과하는 작동유체의 압력강하로 인한 구동력($\sum \Delta P_i \cdot A_i$)에 의해 결정되며, 이를 식으로 나타내면 식(1)과 같고, 이때 고유주파수는 식(2)와 같이 나타난다.[5]

$$m_d \ddot{x}_d + c_d \dot{x}_d + k_d x_d = \sum \Delta P_i \cdot A_i \quad (1)$$

$$\omega_n = \sqrt{k_d / m_d} \quad (2)$$

$$\zeta = c_d / \sqrt{4m_d k_d} \quad (3)$$

Fig. 2 및 Fig. 3은 식(1)의 해를 운전주파수의 변화에 대해 각각 변위의 진폭 및 구동력과 변위의 위상차를 도시한 그림으로, Fig. 2에서 고유주파수보다 낮은 운전주파수 영역에서는 변위의 진폭이 정적 변위와 큰 차이가 없으나, 운전주파수가 증가함에 따라 점차 증가하여, 고유주파수 부근에 근접하는 운전주파수 영역에서 마찰계수에 따라 다소의 차이는 있으나, 최대의 변위 진폭이 발생함을 알 수 있으며, 마찰계수가 커짐에 따라 최대 변위진폭이 발생하는 운전주파수 영역이 작아짐을 알 수 있다. Fig. 3에서 이 영역에서 구동력과 위상차는 90도가 됨을 알 수 있다.

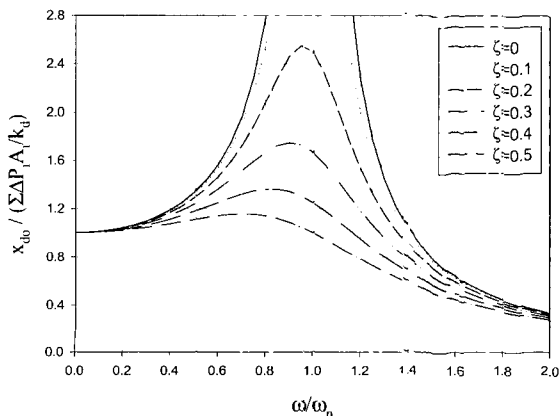


그림 2. 운전주파수에 따른 변위특성
Fig. 2. Force ratio vs. frequency ratio

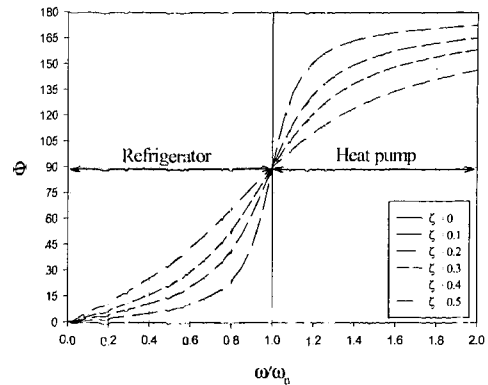


그림 3. 운전주파수에 따른 위상특성
Fig. 3. Phase angle vs. frequency ratio

또한 변위기 스프링의 강성과 변위기 양단의 압력차가 변위의 진폭에 큰 영향을 미치며, 마찰계수의 크기가 변위기의 변위 뿐만 아니라 위상에도 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

한편 스테링 냉동기의 냉동의 발생은 이상적인 냉동능력(ideal refrigeration power)을 나타내는 식(4)에서 알 수 있는 바와 같이, 팽창부의 압력변화와 변위의 상관관계 즉 PV일(PV work)에 의해 결정된다.

$$Q_{ideal} \approx f \int_0^{\tau} P_e A_e dx_d \quad (4)$$

여기서 f 는 운전주파수, P_e 는 팽창공간의 압력, A_e 는 팽창공간의 단면적을 나타낸다.

한편 팽창공간의 압력 및 변위기의 운동을 식(5) 및 (6)과 같이 정현파로 가정하면, 이상적인 냉동능력은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = P_o \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$x_d \approx x_{d0} \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

$$Q_{ideal} \approx \pi f P_o A_e x_{d0} \sin \phi \quad (7)$$

따라서 식(7)로부터 스테링 냉동기에서 최대의 냉동능력을 얻기 위해서는 복사열손실, 전도열손실 등의 팽창부 열손실의 최소화 뿐만 아니라, 변위기 변위의 최대화와 팽창공간의 압력과 변위기 변위사이의 위상차의 최적화가 요구됨을 알 수 있으며, 동일한 압력진폭과 변위기 특성 조건에서는 운전주파수가 높을수록 냉동능력이 증대되지만, 한 주기당 냉동능력 측면에서 살펴보면, 재생기를 통과할 때 발생하는 작동유체의 압력강하의 크기가 팽창기내의 압력진폭에 비해 작다는 홍용주 등[6]의 실험결과를 감안할 때, 최대의 냉동능력을 발휘할 수 있는 스테링 냉동기를 설계하기 위해서는 변위기 운동특성의 최적화가 필수적이다.

2.1. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 스테링 냉동기는 FPPD형이며, 선형 압축기 크기는 $\phi 55\text{mm} \times 120\text{mm}$ (length) 이고, 팽창기 실린더 크기는 $\phi 7\text{mm} \times 70\text{mm}$ (length)이다.[7]

Fig. 4는 스테링 냉동기 및 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 상온의 주위로부터 열침투를 차단하기 위해 팽창기의 cold end를 진공용기(dewar)내에 설치하였으며, 실험에 사용된 진공용기는 길이 160mm,

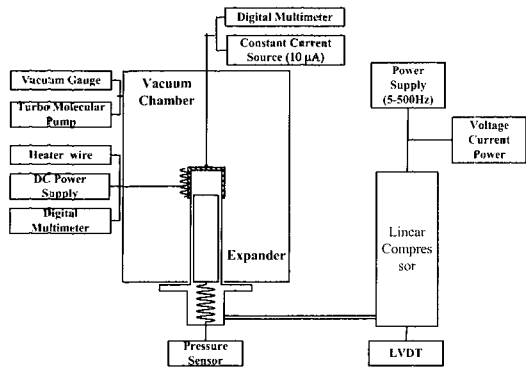


그림 4. 실험장치 개략도
Fig. 4. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

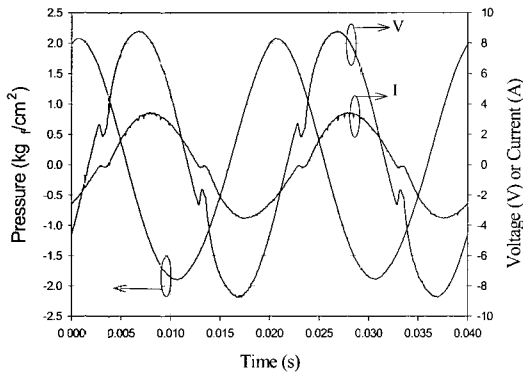


그림 5. 스텐링냉동기의 전압, 전류, 압력 파형
Fig. 5. Typical wave form of voltage, current and pressure in the Stirling cryocooler

내경 80mm, 두께 5mm의 스테인레스강으로 제작하였다. 진공 플랜지에 연결된 스텐링 냉동기는 저온부에 온도측정을 위한 silicon-diode 온도센서와 저온부 온도조절 및 냉동능력을 측정하기 위한 열선(heater wire)을 부착하였고, 진공용기 내벽으로부터의 유입되는 복사열손실을 방지하기 위하여, 팽창기를 super-insulation으로 수습접 감은 뒤, 팽창기의 저온부를 진공용기 내부에 설치하였다.

스텐링 냉동기와 조립된 진공용기는 터보분자(turbo-molecular) 진공펌프를 사용하여, 실험중 약 10^{-6} Torr의 진공도를 유지함으로써 대류 및 전도열전달에 의한 열손실을 방지하였다. 또한 선형압축기 헬, 연결관, 팽창기 고온부와 대기에 T type 열전대를 부착하여 실험 중 온도변화를 측정하였다. 한편 선형압축기 운전주파수와 전압의 조절은 Fujitz사의 교류전원기를 사용하였다. 측정된 압력, 온도 등의 결과들은 Labview™ 데이터 처리 프로그램을 이용하여 수집하였다. 실험은 운전주파수의 변화에 따른 선형압축기의 특성변화에 의한 영향을 배제하기 위해, 팽창기로 공급되는 압력 파형이 일정하게 유지되도록 선형압축기의 입력전압을 조절하며, 변위기의 마찰력으로 인한 특성변화를 억제하기 위해 일정한 cold end부 온도(150K)에서 냉동능력을 측정하였다. Fig. 5는 이와 같은 냉동기 운전조건에서 구한 선형압축기 입력전압 및 전류 파형과 팽창공간의 압력 파형이다.

2.2. 실험결과 및 고찰

FPPD형 스텐링 냉동기는 선형압축기의 운전주파수에 따라 저온부의 최저도달온도가 크게 영향을 받으며, 냉동능력, 입력전력 등의 작동 특성에 큰 변화가 발생하는 특징을 가지고 있으며, 최적의 운전주파수는 피스톤 및 왕복기의 코일스프링 및 가스스프링에 의해 결정되는 스텐링 냉동기의 고유진동수 ($\omega_n = \sqrt{(k_{spring} + k_{gas})/m}$) 즉 선형압축기의 고유진동수 및 왕복기의 고유진동수에 의해 결정된다.(8,9)

Fig. 6은 충전압력 변화에 따른 선형압축기의 고유진동수를 나타낸 그림으로, 충전압력이 증가함에 따라 압축공간 내의 가스스프링 역할이 증대됨으로 인하여 선형압축기의 고유진동수가 증가됨을 알 수 있다. 또한 실험에 사용된 선형압축기는 약 $12 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 의 충전압력에서 고유진동수가 50Hz 부근으로 나타나, 이 영역이 최적의 선형압축기 운전 조건이 됨을 알 수 있다. Fig. 7은 충전압력 변화에 따라 측정된 선형압축기의 효율을 나타낸 그림으로, 이때 압축기의 효율은 식(4)와 같다.

$$\eta_c = \frac{V_{rms} I_{rms} \cos \theta - I_{rms}^2 R}{V_{rms} I_{rms} \cos \theta} \quad (4)$$

여기서 V는 인가전압, I는 전류, $\cos \theta$ 는 역율(power factor), R은 전기저항을 의미하며, 하첨자 rms는 실효치를 나타낸다.

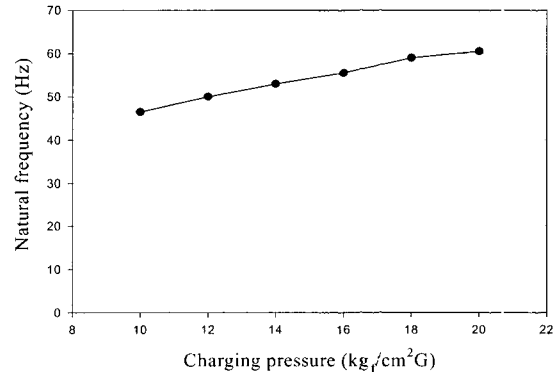


그림 6. 충전압력에 따른 선형압축기의 고유주파수
Fig. 6. The natural frequency of the linear compressor in the Stirling cryocooler

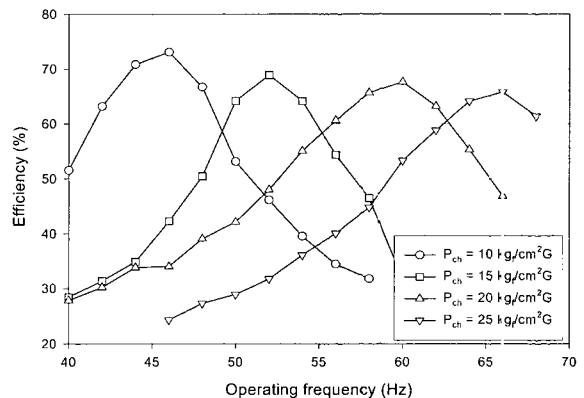


그림 7. 충전압력변화에 따른 선형압축기 효율
Fig. 7. The efficiency of the linear compressor

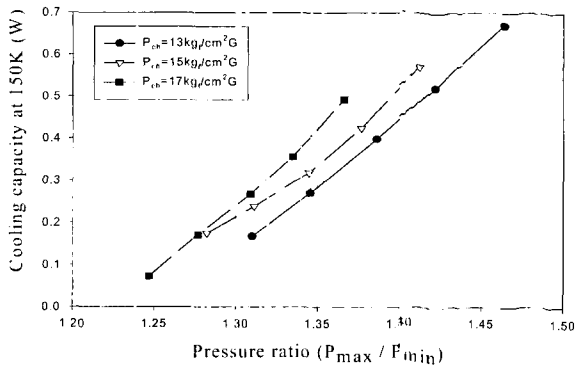


그림 8. 압력비에 따른 냉동능력 (운전주파수 50Hz)
Fig. 8. The cooling capacity with different pressure ratio at given operating frequency

실험결과는 충전압력의 변화에 따라 선형압축기의 최대의 효율은 약 70% 전후로 나타났으며, 최대효율을 나타내는 운전주파수가 충전압력에 따라 변화하며, 충전압력이 높아질수록, 압축기의 최대 효율이 다소 저하됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 일정한 선형압축기 운전주파수(50Hz)에서 저온부의 온도가 150K로 동일한 조건에서, 팽창공간에서 발생하는 한 주기 중에 발생하는 고압과 저압의 차이의 비율 변화에 따른 냉동능력 변화를 나타낸 그림이다. 이때 압력비의 변화는 선형압축기로 공급되는 전력의 변화를 통해 생성하였으며, 실험결과 충전압력에 관계없이 압력비가 증가할수록 주 입력전력이 증가할수록 냉동능력은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 충전압력이 작은 경우 더 큰 압력비를 생성하였으나, 동일한 압력비에서는 충전압력이 증가되면 냉동능력이 증가하였다.

Fig. 9는 팽창기로 공급되는 압력 과형의 고압과 저압의 차이가 4 kg/cm²로 일정하고 저온부 온도가 150K로 유지될때 측정된 냉동능력으로, 충전압력 변화시 및 운전주파수의 변화에 대해 도시하였다. 실험결과는 충전압력이 변화하여도 47.5 ~ 50Hz의 운전주파수 영역에서 최대의 냉동능력을 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 50Hz 이상의 운전주파수 영역에서는 급격한 냉동능력의 감소가 발생하였다. 냉동능력이 일정한 운전주파수 영역에서 최대가 됨은, 압력차를 일정하게

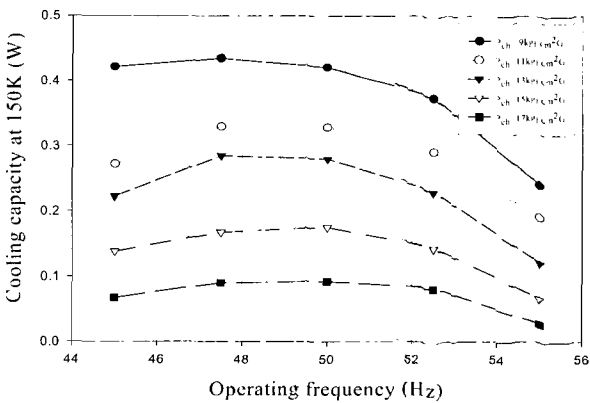


그림 9. 운전주파수 변화에 따른 냉동능력
Fig. 9. The cooling capacity with different operating frequency

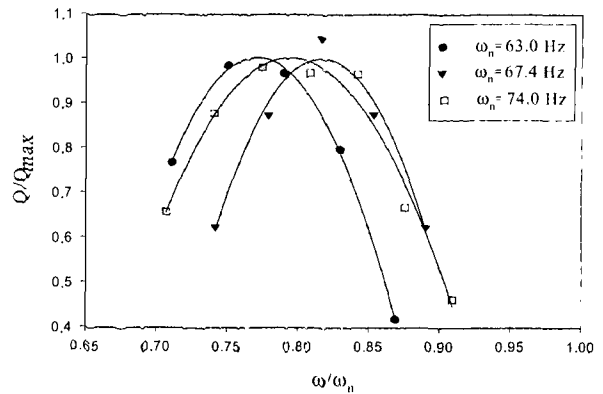


그림 10. 변위기 고유진동수 변화에 따른 스테링 냉동기 냉동능력 특성
Fig. 10. The cooling capacity characteristics with natural frequency of the displacer

하여 선형압축기의 영향이 배제되고, 저온부의 온도가 일정하기 때문에 복사손실, 셔틀열손실(shuttle heat loss) 등의 열손실이 큰 차이가 발생하지 않는다면, 변위기의 동특성이 인정한 운전주파수 영역에서 최적화됨을 의미하는 것으로 판단된다. 또한 50Hz이상의 운전주파수 영역에서의 냉동능력 감소는 Fig. 2 및 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 운전주파수가 변위기의 고유주파수에 근접해 가면 변위기의 변위는 증가하나 구동력과 변위기 변위의 위상차가 최적의 위상차로부터 벗어나기 때문으로 판단된다. 한편 스테링 냉동기 충전압력이 증가할수록 동일한 운전주파수에서 냉동능력이 감소하였다. 이와 같은 충전압력에 대한 냉동능력변화는 Fig. 8의 압력비 감소의 경우와 잘 일치한다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 나타난 최대 냉동능력시의 운전주파수와 변위기의 고유진동수의 관계를 규명하기 위해, 변위기의 코일스프링 강성을 변화시켜 구한 스테링 냉동기의 냉동능력 특성이다.

실험은 재생기를 통과하는 압력강하특성 및 구동부의 질량을 동일하게 유지하기 위해 같은 변위기를 사용하였으며, 팽창부의 체적변화로 인한 변화를 억제하기 위해 동일한 자유높이를 가지는 코일스프링을 사용하여 변위기의 고유주파수가 각각 63.0, 67.4, 74.0Hz의 세 경우에 대해 실험을 수행하였다.

실험결과 고유주파수가 63Hz인 경우 스프링 강성이 낮아 측력(side force)에 의한 특성변화로 인해 큰 냉동능력의 저하가 발생하였으나, Fig. 10에 나타난 바와 같이 각각의 경우의 최대의 냉동능력으로 무차원화하면, 세 경우 모두 운전주파수와 변위기 고유주파수의 비가 약 0.8 부근에서 최대의 냉동능력이 발생하였다.

Fig. 2의 운전주파수에 따른 변위특성에서 알 수 있는 바와 같이 운전주파수가 변위기의 고유주파수보다 작은 영역에서는 선형압축기의 운전주파수가 변위기의 고유주파수에 근접하면 변위기 변위의 진폭이 증가하고, Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 운전주파수에 따른 위상특성이 변화하여, 이들의 관계식으로 표현되는 식(7)의 각종 손실을 배제한 이론적인 냉동능력은 운전주파수가 증가함에 따라 커지게 된다. 그러나 변위기와 팽창기 간극의 마찰력으로 인해 주파수비 1(고유주파수에서 운전될 때)일 때 보다 다소 낮은 주파수비 영역의 운전주파수 영역에서 변위기 진폭과 위상각함수(sin φ)의 값이 더 크게 되고, 이론적인 냉동

능력은 이 영역에서 최대가 된다. 또한 주파수비 0.8 부근에서 운전될 때 재생기의 비가역성 및 각종 손실이 미치는 영향이 최소화되어, 주파수비 0.8 부근에서 운전될 때 열역학적 특성이 최적화되고, 이와 같은 결과는 주파수비 0.67~0.83에서 최대냉동능력이 생성되는 Huang[9]의 해석결과와도 부합되는 것으로 판단된다.

따라서 선형압축기형 스테링 냉동기의 운전주파수를 50Hz 부근으로 설정하기 위해서는 변위기 고유주파수가 약 62.5Hz로 설계하여야, 최대의 냉동능력을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결 론

PPFD형 스테링 냉동기의 변위기의 동특성이 냉동능력에 미치는 영향을 규명하기 위해, 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 스테링 냉동기가 일정한 운전주파수에서 운전될 때, 동일한 압축비인 경우 충전압력이 증가되면 냉동기의 냉동능력이 증가한다.

(2) 특정 운전주파수 영역에서 최대냉동능력이 발생하였고, 이는 그 특정 운전주파수 영역에서 변위기의 동특성이 최적화됨을 의미하는 것으로 판단된다.

(3) 스테링 냉동기 운전주파수와 변위기 고유주파수의 주파수비가 약 0.8 부근에서 최대의 냉동능력이 발생한다.

(4) 큰 냉동능력을 얻기 위해서는 스테링 냉동기의 운전주파수 선정시 선형압축기의 고유주파수 뿐만 아니라 운전주파수와 변위기의 고유주파수와의 관계를 고려하여야 한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 박성제, 고득용, 홍용주, 김효봉, "Linear Compressor 스테링 냉동기 설계에 관한 연구", 2000년도 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 81-84, 2000
- [2] 박성제, 홍용주, 김효봉, 고득용, 김양훈, 유병건, 이기백, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스테링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회 논문지, 3권, 2호, pp. 62-68, 2001
- [3] 홍용주, 박성제, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "스테링냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001
- [4] A. K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical

Society, pp.1136-1141, 1979

- [6] R. F. Steidel, Jr, An Introduction to Mechanical Vibrations, John Wiley & Sons, Inc, 1979
- [7] 박성제, 홍용주, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "선형압축기형 스테링 극저온 냉동기의 설계, 제작에 관한 연구", 대한설비공학회 2001 하계학술발표회 논문집, pp. 234 - 238, 2001
- [8] 박성제, 홍용주, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "스테링 극저온 냉동기의 성능향상에 관한 연구", 대한설비공학회 2001 동계학술발표회 논문집, pp. 89-93, 2001
- [9] B. J. Huang and C. W. Lu, "Split-type free-displacer Stirling refrigerator design using linear network analysis", Cryogenics, Vol. 36, No. 12, pp. 1005-1017, 1996

저 자 소 개



홍용주(洪溶柱)

1968년 03월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 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(金孝烽)

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



유병건(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



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