

충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스테링 냉동기 개발

The effect of the charging pressure and operating frequency in the Stirling Cryocooler

박성제*, 홍용주*, 김효봉*, 고득용*, 김양훈*, 유병건**, 이기백***

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

Abstract : This paper presents manufacturing process and test results in the optimum pressure and operating frequency for the free piston free displacer(FPFD) Stirling cryocooler designed and manufactured by Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM). FPFD Stirling cryocooler is currently under development for cooling infrared detector. The compressor uses opposed linear motors to drive opposed pistons. The performance of FPFD Stirling cryocooler is evaluated as a function of charging pressure and operating frequency. In general, as the charging pressure is increased, optimum operating frequency of the compressor is increased but natural frequency of the displacer is almost constant. The prototype has achieved no load temperature of 49K and cooling capacity of 0.5W at 72K.

Key Words : linear compressor, displacer, regenerator, charging pressure, operating frequency, cooling capacity

기 호 설 명

- a : Compression parameter
- B_g : Magnetic flux(T)
- C_{ad} : Constant
- F_{coil} : Driving force(N)
- f_d : Natural frequency of the displacer
- f_b : Operating frequency of the compressor
- i : Current(A)
- k : Spring constant
- M : Mass of the piston
- M_d : Mass of the displacer
- P : Mean pressure(Pa)
- S : Cross section area of the piston
- V : Buffer volume(m³)
- x : Actual stroke(m)
- x_m : Maximum mean stroke(m)

* 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체환경연구부

** 정 회 원 : 우영기술원

*** 정 회 원 : 부산대학교

원고접수 : 2001년 10월 12일

심사완료 : 2001년 11월 09일

그리스 문자

- ϕ_{dr} : Phase shift between piston and displacer
- ω : angular velocity

하첨자

- d : displacer

1. 서 론

선형 압축기를 이용한 스테링 극저온 냉동기(Stirling Cryocooler)는 기존의 극저온 냉동기에 비해 저진동, 소형 경량, 낮은 소요동력, 충분한 내구성 등의 장점을 가지고 있어서 야간 투시경용 적외선 센서(0.5 ~ 2.0W at 77K) 및 이동 통신 무선기지국용 초전도 필터 냉각용(3 ~ 6W at 77K)으로 널리 사용되고 있다.

미국의 Inframetrics, 영국의 Hymatic, 네델란드의 Signaal Usfa 등에서는 1950년대부터 스테링 극저온 냉동 사이클을 연구하기 시작하여, 1980년대 이후부터는 영국의 Oxford 대학에서 고신뢰성을 가진 linear compressor를 소개하면서 현재 MTTF(Mean Time Till Failure) 5000시간 이상의 고수명 스테링 극저온 냉동기를 생산하고 있다.

이에 반해 국내에서는 기초 설계 및 해석에 관한 연구만 진행되었을 뿐이다.

스테링 극저온 냉동기는 적외선 센서 및 초전도 필터 냉각 시스템의 구조에 따라 압축부와 팽창부가 일체형으로 되어 있는 일체형 스테링 극저온 냉동기와 분리되어 있는 분리형 스테링 극저온 냉동기로 구분되며, 압축기의 형상에 따라서는 크랭크에 의해 구동되는 크랭크식 압축기와 선형 모터(linear motor)에 의해 구동되는 선형 압축기로 구분된다. 특히 압축기의 실린더와 피스톤 사이의 마찰을 최소화하기 위한 베어링은 여러 가지 형태로 개발되어 가스 베어링, gap 베어링, flexure 베어링 등 다양하다.

또한 스테링 극저온 냉동기를 설계, 제작할 때 고려하여야 할 점은 (1) 냉각온도, (2) 냉동부하, (3) 신뢰성, (4) 진동, (5) 온도 제어성, (6) 냉각 시간 및 입력, (7) 체적, 중량, (8) 설치 환경 및 비용 등의 관점에서 충분한 검토가 필요하다⁽¹⁾.

특히 스테링 극저온 냉동기의 설계시에 작동 변수는 성능에 커다란 영향을 미치므로 (1) 작동 압력, (2) 작동 주파수, (3) 실린더와 피스톤의 간극, (4) 자석

과 코일의 배치, (5) 스프링 상수, (6) split tube, (7) 재생기 등의 설계 및 정밀 가공, 제작은 매우 중요하다.

그리고 스테링 극저온 냉동기의 신뢰성은 비용과 직접적인 관계가 있기 때문에 가장 중요한 설계 요소로서 고려되어야 할 문제이다. 신뢰성에 영향을 주는 인자로서는 실린더와 피스톤 사이의 마찰을 최소화하기 위한 동심도 및 피스톤 마찰면의 내마모성 설계, 제작, 스프링 변형의 최소화, 냉동기내에 작동 가스 이외의 미세 가스 및 분진의 제거, 작동가스 누설의 최소화 등이다⁽²⁾.

따라서 본 연구에서는 적외선 센서 냉각용 선형 압축기형 스테링 극저온 냉동기를 설계, 제작하기 위한 과정과 핵심부품들에 대한 평가 및 시작품의 충전압력과 작동주파수 변화에 따른 성능시험 결과를 소개하고자 한다.

2. 스테링 극저온 냉동기 설계 및 제작

2.1. 스테링 극저온 냉동기 시스템 설계

스테링 극저온 냉동기는 압축부와 팽창부로 구성되며, 압축부는 내·외부 요크, 실린더, 피스톤, 코일, 스프링과 전류입력단자 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 재생기를 포함한 변위기(displacer), 변위기 실린더, 스프링, 고온부 열교환기 및 저온부(cold end) 등으로 구성되어 있으며, 기본 작동과정은 시스템 압력을 높이기 위한 등온 압축과정, 작동가스를 저온부로 이동시키는 등적 과정, 저온부로부터 열을 흡수하는 등온팽창과정과 압축부로 작동가스가 이동하는 등적과정으로 이루어진다.

적외선 센서 냉각용 스테링 극저온 냉동기에 요구되는 사양을 표 1에 나타내었다. 77K에서 0.5W의 냉동능력은 운용 초기의 값이고, 운용 수명 5000시간 이후의 냉동능력은 20% 정도 내려가는 것으로 상정한다.

냉동기에 요구되는 항목과 요구항목을 만족하는 최적 구조를 정리하여 표 2에 나타내었다.

구동기구로서는 작동 공간에 극저온에서 고화되는 물질이 없는 Oil free 구조가 용이한 것이 바람직하다. 모터는 작동주파수와 구동력의 조절이 가능하고, 축력(side force)이 적은 선형 압축 형태가 적당하다. 또한 지지구조 및 베어링은 접촉을 최소화하고 가동부인 피스톤과 팽창기를 실린더 중심에 유지하는 방식이 요구되며, 제어성에 관해서는 냉각면 온도를 일정하게 유지하는 변위 제어 방식을 채택한다.

표 1. 극저온 냉동기의 성능

Table 1. Performance of cryocooler

Items	Specifications
Refrigerating cycle	Stirling cycle
Cooling power	0.5W at 77K
MTTF	5,000hours
COP	0.03
Cooldown time	5min
Configuration	Split linear

표 2. 극저온 냉동기의 최적 구조

Table 2. Optimum structure of cryocooler

Items	Requirements	Optimum structure
Drive mechanism	Oil free	Free Piston Free Displacer
Motor	Controllability of frequency, force etc.	Linear motor
Bearing	Low-contact High centering	coil spring fine gap seal
Control	cooling power control	displacement control

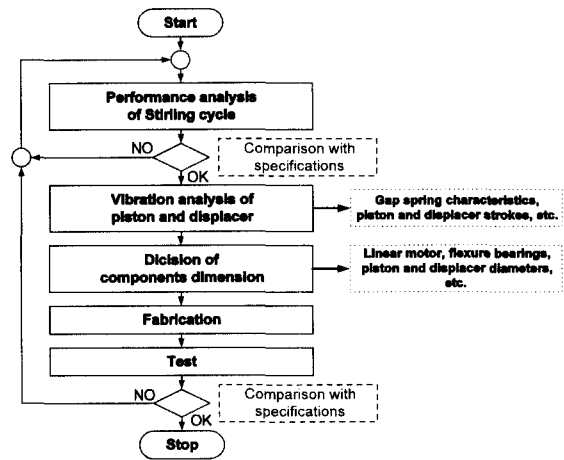


그림 1. 설계 흐름도

Fig. 1. Design Flow chart

Free piston free displacer 형 스테링 극저온 냉동기의 설계는

- (1) 냉동능력을 기초로 한 열역학적 검토에 의해 각 부품의 크기와 주파수, 행정 등의 구동 조건을 결정
- (2) 구동 조건을 만족시키기 위해 진동계의 검토에 의한 피스톤 및 팽창기의 구동력 결정
- (3) 결정한 구동력을 얻기 위해 리니어 모터 사양 및 리니어 모터에서 발생하는 반경 방향 힘을 지지하는 베어링계 사양 결정

의 순서로 검토한다. 본 설계 순서를 정리하여 그림 1에 나타내었다.

2.2. 공진 주파수

선형압축기형 스테링 극저온 냉동기는 압축기의 공진주파수와 변위기의 공진주파수에 따라 피스톤과 변위기 사이의 최적 위상차가 결정되며, 압축기의 공진주파수는 코일 스프링과 가스 스프링의 복합적인 영향에 의해 결정된다. 압축기에서의 입력은 공진주파수에서 최저로 되기 때문에 먼저 압축기의 공진주파수를 결정하고 피스톤과 변위기의 최적 위상 차를 유도하기 위하여 변위기의 공진 주파수를 결정하게 된다.

코일 스프링을 무시할 때, 그림 2에서 압축기에서의 운동방정식은

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{coil} \sin(\omega t), \quad F_{coil} = B_g \cdot I \cdot i \quad (1)$$

이고, 가스스프링의 힘은 (2)와 같이 표현되며⁽³⁾,

$$F_{gas\ spring} = \frac{-\alpha \bar{P} S^2 x}{S(x_m - x) + V} \quad (2)$$

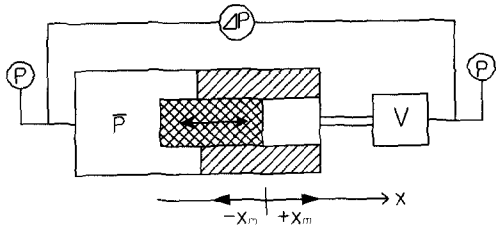


그림 2. 코일 스프링 없는 압축기의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of compressor without coil spring

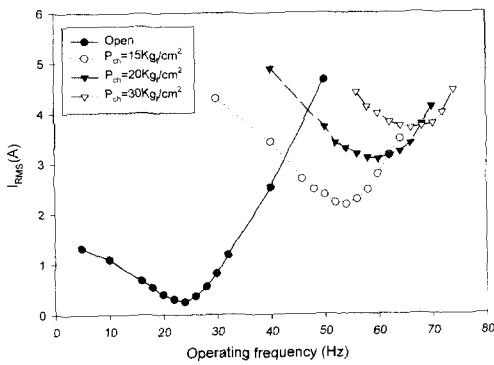


그림 3. 충전압력에 따른 전류 변화
Fig. 3. Current variation with different charging pressure

코일 스프링을 무시할 때와 포함할 때의 공진 주파수는 각각 (3)과 (4)식으로 표현된다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha \bar{P} S^2}{(Sx_m + V)M}} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k + \frac{\alpha \bar{P} S^2}{Sx_m + V}}{M}} \quad (4)$$

그림 3은 작동주파수를 변화시킬 때, 충전압력에 따른 입력 전류의 변화를 보여주고 있다. 입력전류가 최저인 작동주파수가 공진주파수를 의미하며, 충전압력이 증가함에 따라 공진 주파수가 증가하는 것을 알 수 있고, 그때의 입력전류도 증가함을 알 수 있다.

또한 식 (4)에 의해 피스톤 단면적, split tube 길이, 피스톤의 질량, 코일 스프링 상수 등도 공진 주파수에 영향을 주기 때문에 이에 대한 검토도 필요하다^{(4), (5)}.

변위기의 공진주파수는 간단히 식 (5)와 같이 표현된다.

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_d}{M_d}} \quad (5)$$

또한 피스톤과 변위기 사이의 위상차는 식 (6)과 같이 표현되며 일반적으로 Free piston free displacer 형 스테어링 극저온 냉동기에 있어서는 $\phi_{dr} = 45^\circ$ 일 때 냉동능력이 최대가 된다.

$$\tan \phi_{dr} = \frac{M_d(\omega_d^2 - \omega^2)}{C_{dd} S_d \omega} \quad (6)$$

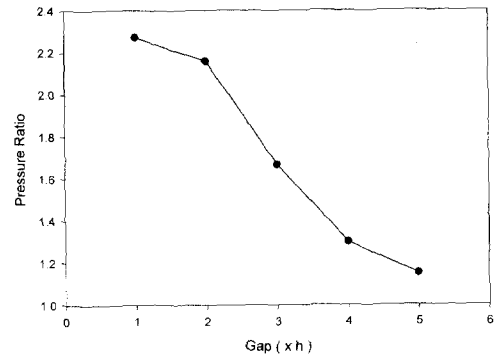


그림 4. 압축기 실린더와 피스톤 사이의 간극 변화에 따른 압력비
Fig. 4. Pressure ratio with different gap between cylinder and piston

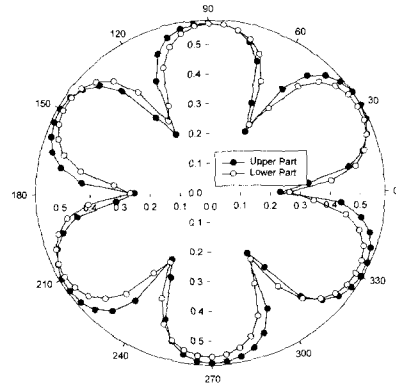
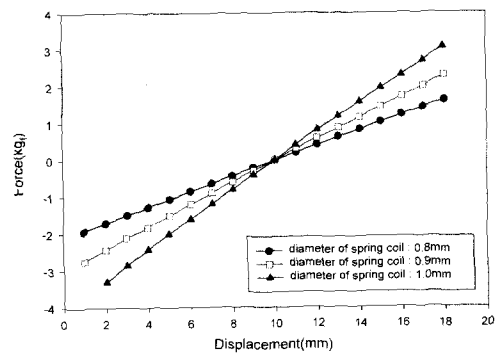
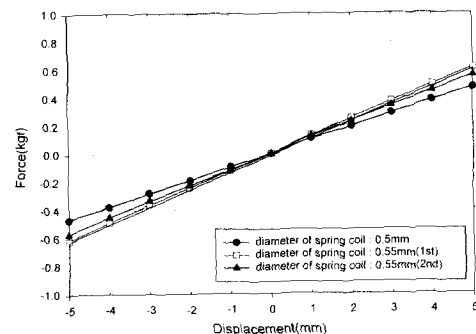


그림 5. 자속 밀도 분포
Fig. 5. Distribution of magnetic flux



(a) compressor spring



(b) displacer spring

그림 6. 스프링 상수
Fig. 6. Spring constant

2.3. 실린더와 피스톤 간극

스테링 극저온 냉동기의 압축기는 압축비가 중요한 설계 인자이며, 압축비는 압축부와 팽창부의 체적과 피스톤과 실린더 사이의 간극에 의해 크게 달라진다. 압축부와 팽창부의 체적은 성능해석 및 공진 주파수를 통해 결정되며, 피스톤과 실린더 사이의 간극은 그림 4에 나타난 결과에 따라 원하는 압력비를 결정하게 된다.

2.4. 자속밀도와 스프링 상수

식 (1)과 식 (4), (5)에 의해 자속밀도와 스프링 상수는 각각 압축기의 구동력과 압축기와 변위기의 공진 주파수를 결정하는 주요 요소이다. 그림 5와 그림 6은 각각 본 연구에서 사용한 자석의 자속 밀도 분포와 스프링 상수를 측정된 결과를 보여준다.

자석은 6조각으로 구성되어 있으며 평균 자속밀도는 0.48[T]이었다.

2.5. 스테링 극저온 냉동기 제작

그림 7은 FPFD 스테링 냉동기의 3차원 도면을 보여주고 있다. 자석은 6조각, 8조각, 10조각 등으로 제작하였고, 재생기는 SUS mesh #200, #250, #300을 약 550 ~ 600장 채웠으며, 스프링은 압축기의 공진 주파수를 조절하기 위하여 변화시켜 조립하였다. 스프링은 피스톤의 중립점 유지와 스프링 상수에 의해 공진주파수를 결정하는 역할을 한다.

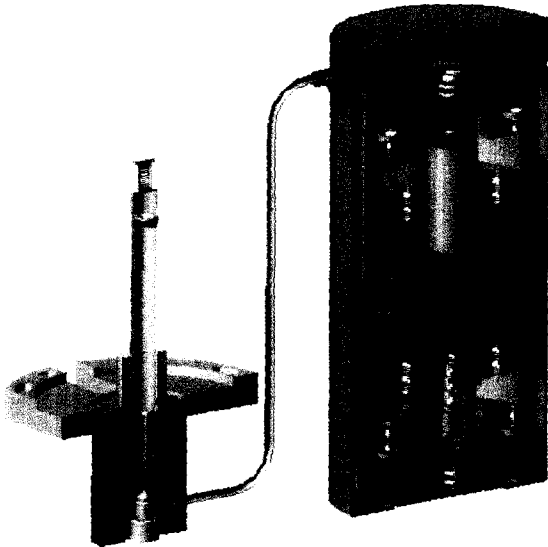


그림 7. 스테링 냉동기의 3차원 도면
Fig. 7. 3-D design of the Stirling cryocooler

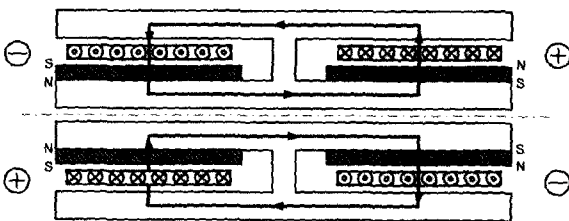


그림 8. 영구자석과 내·외부 요크
Fig. 8. Permanent magnet and inner/outer yoke

그림 8은 내·외부 요크와 자석을 보여주고 있다. 자석은 반경방향으로 착자되어 있으며, 양쪽 자석은 서로 반대방향으로 착자되어 자기회로가 큰 루우프를 그린다. 코일은 코일 support에 부착되어 있는 피스톤이 압축과 팽창이 이루어 질 수 있도록 서로 반대방향으로 전류를 흘려준다.

3. 성능시험장치 및 실험 방법

그림 9는 스테링 냉동기 성능시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 이 실험에 사용된 진공용기는 길이 160mm, 내경 80mm, 두께 5mm의 스테인레스강이었다. 진공플랜지에 연결된 스테링 냉동기는 저온부에 온도센서와 열선(heater wire)을 부착하고, 진공용기 내벽으로부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super-insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 스테링 냉동기와 조립된 진공용기는 유화산 진공펌프를 사용하여 약 10^{-5} Torr의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다.

스테링 냉동기 저온부의 온도는 silicon-diode 센서를 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 9.5Ω의 망가닌 열선을 저온부에 감고 전류를 흘려 일정온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다. 또한 압축기 셀, 연결관, 변위기 고온부와 대기에 T type 열전대를 부착하여 온도변화를 관찰하였다.

그리고 압축기 양쪽 피스톤의 변위를 측정하기 위하여 Shaevitz사의 LVDT를 사용하였으며, 압축기 출구의 압력과 압축기 양쪽 버퍼의 압력을 측정하기 위하여 PCB사의 piezo type dynamic 압력 센서 및 Kyowa사의 strain gauge type 압력 센서를 사용하였다.

또한 작동주파수와 입력전류, 전압의 조절은 Fujitz사의 AC power supply를 사용하였으며, 실험에 사용된 스테링 냉동기의 코일에는 입력전류 및 전압에 각각 4A, 10.2V의 한계가 있기 때문에 그 이상 넘지 않도록 조절하였다.

이러한 모든 실험 자료들은 Labview 데이터 처리 프로그램을 이용하여 처리함으로써 신속한 결과 해석이 가능하였다. 그림 10은 Labview 데이터 처리 프로그램에 의한 결과 그림을 보여주고 있다.

스테링 냉동기의 성능시험은 선형압축기의 충전압력을 변경하며 공진주파수를 측정하고, 공급전압 및 작동주파수에 따른 최저도달온도와 냉동능력을 측정함으로써 무부하 실험과 부하 실험을 병행하였다.

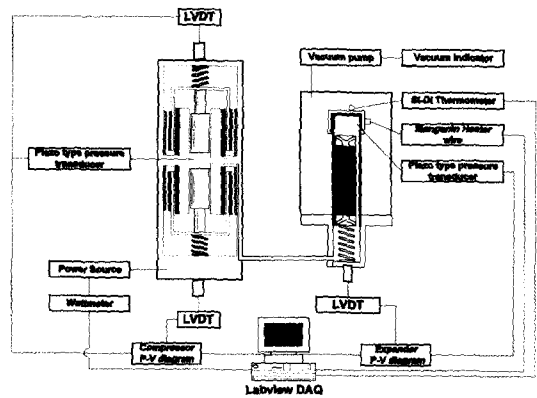


그림 9. 스테링 냉동기 성능시험장치
Fig. 9. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

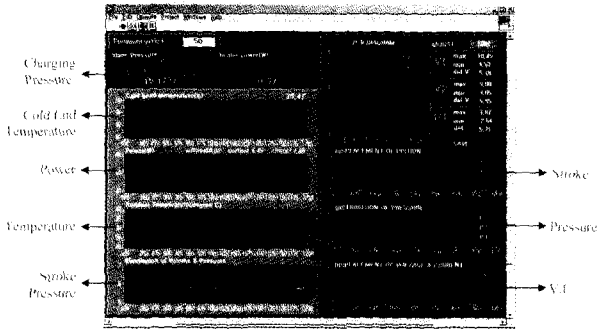


그림 10. Labview 데이터 수집 프로그램
Fig. 10. Labview data acquisition program

4. 결과 및 고찰

4.1. 충전압력에 따른 공진주파수 특성

그림 11은 작동유체의 충전압력 변화에 따른 압축기와 변위기의 공진주파수 변화를 보여주고 있다. 압축기의 공진주파수는 충전압력이 증가함에 따라 가스 스프링의 영향으로 증가하고 있으며, 변위기의 공진주파수는 재생기의 고온부와 저온부 사이에 압력차가 거의 없으므로 가스 스프링 영향이 없어 약 67Hz로 거의 일정하였다. 변위기의 공진주파수를 고려할 때, 작동주파수를 50Hz로 하는 것이 가장 타당하며, 충전압력은 압축기의 입력이 가장 적은 공진주파수 부근의 12 ~ 14kg_i/cm²G가 가장 적당하다.

4.2. 공급전압에 따른 특성 변화

그림 12는 충전압력 12.5kg_i/cm²G, 작동주파수 50Hz 일 때, 공급전압에 따른 압축기의 압력변화를 보여주고 있다. 공급전압이 증가함에 따라 압력 진폭이 증가하였고, 저압영역이 고압영역보다 지속시간이 약 20% 길었으며, 최대공급전압 10V에서 약 3kg_i/cm²의 진폭을 나타내었다.

그림 13은 충전압력 12.5kg_i/cm²G, 작동주파수 50Hz 일 때, 공급전압에 따른 입력 전력 및 전류변화를 보여주고 있다. 충전압력의 증가에 따라 입력 전력 및 전류가 선형적으로 증가하였으며, 공급전압 10V에서 입력 전력 및 전류는 각각 36W, 3.6A이었다.

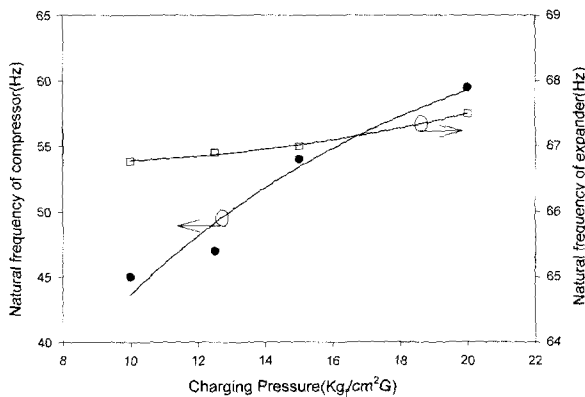


그림 11. 압축기 및 변위기의 공진주파수
Fig. 11. Natural frequency of compressor and displacer

그림 14는 충전압력 12.5kg_i/cm²G, 작동주파수

50Hz 일 때, 공급전압에 따른 냉각특성을 보여주고 있다. 공급전압의 증가에 따라 냉각시간은 짧아지고, 최저도달온도는 낮아짐을 알 수 있다. 10V의 공급전압에서 77K까지의 도달시간은 약 2분 10초로서 기존의 적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기보다 우수한 성능을 나타내었다.

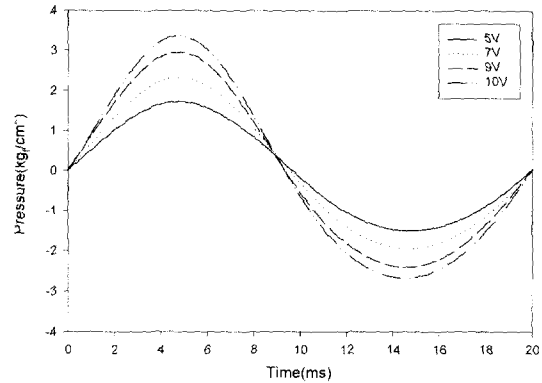


그림 12. 공급전압에 따른 압축기의 압력 변화
Fig. 12. Pressure variation of compressor with applied voltage

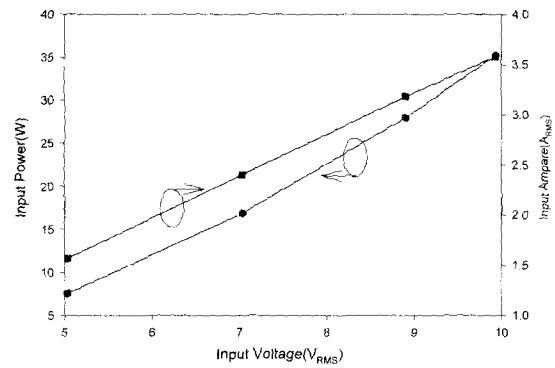


그림 13. 공급전압에 따른 입력 전력 및 전류 변화
Fig. 13. Ampere and power variation with applied voltage

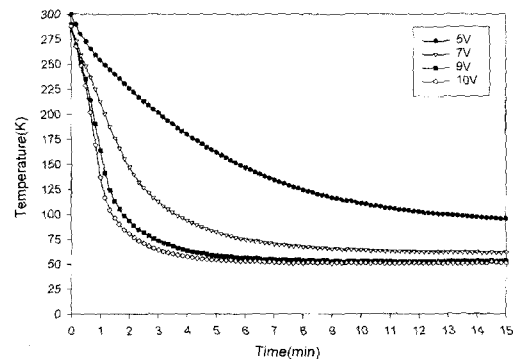


그림 14. 공급전압에 따른 냉각 특성
Fig. 14. Cool down characteristics with applied voltage

4.3. 작동주파수에 따른 특성 변화

그림 15는 충전압력 14kg_i/cm²G, 무부하 조건에서 작동주파수에 따른 스테링 냉동기 저온부에서의 냉각

특성을 비교한 그림이다. 작동주파수 50Hz에서 가장 빨리 저온으로 안정되고, 작동주파수 45Hz, 55Hz, 60Hz 순으로 저온으로 안정되는 시간이 많이 소요 된다는 것을 알 수 있다. 특히 작동주파수 45Hz, 50Hz, 55Hz에서는 최저도달온도가 약 50K로써 거의 비슷하지만, 60Hz에서는 최저도달온도가 약 63K이었다.

그림 16과 그림 17은 충전압력 14kgf/cm²G 일 때의 냉동능력과 성능계수를 보여주고 있다. 냉동능력과 성능계수는 50Hz에서 가장 높았으며, 최저도달온도는 49K, 72K에서의 냉동능력은 0.5W, 성능계수는 0.014이었다.

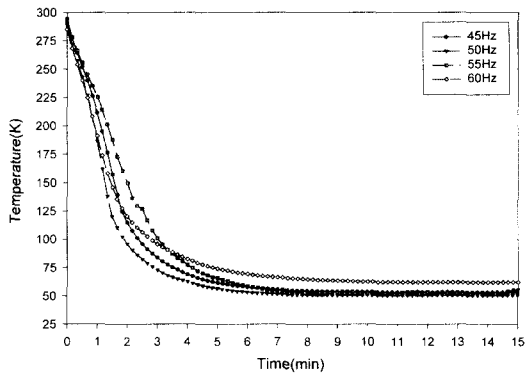


그림 14. 작동주파수 변화에 따른 냉각 특성
Fig. 14. Cool down characteristics with operating frequency

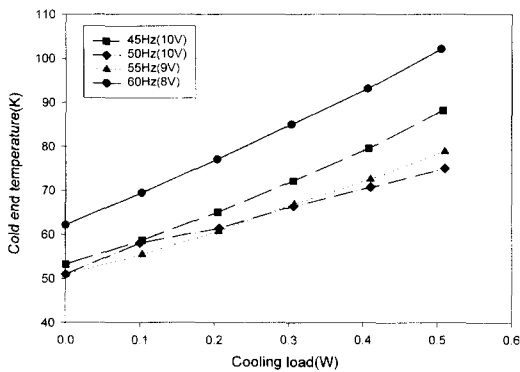


그림 15. 작동주파수 변화에 따른 냉동능력
Fig. 15. Cooling capacity with operating frequency

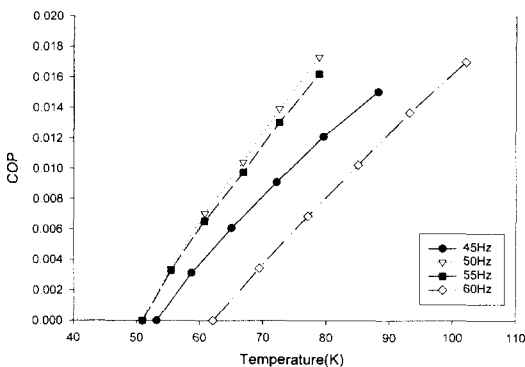


그림 16. 작동주파수 변화에 따른 성능계수
Fig. 16. COP with operating frequency

5. 결 론

77K에서 0.5W급 적외선 센서 냉각용 선형 압축기형 스테링 극저온 냉동기를 설계, 제작하여 충전압력과 작동주파수 변화에 의한 성능시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 충전압력을 변경하므로써 압축기의 공진주파수가 많이 바뀌므로 작동주파수(50Hz)를 압축기의 공진주파수가 되도록 압력을 충전하면 압축기에 입력이 가장 적게 소요된다.
- (2) 압축기의 공진주파수는 충전압력이 증가함에 따라 가스 스프링의 영향으로 증가하고 있으며, 변위기의 공진주파수는 가스 스프링 영향이 없어 약 67Hz로 거의 일정하였다.
- (3) 충전압력 12.5kgf/cm²G, 작동주파수 50Hz이고, 공급전압을 증가시킬 때, 10V의 공급전압에서 77K까지의 도달시간은 약 2분 10초로서 기존의 적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기보다 우수한 성능을 나타내었다.
- (4) 충전압력 14kgf/cm²G, 무부하 조건에서 작동주파수에 따른 스테링 냉동기 저온부에서의 냉각 특성은 작동주파수 50Hz에서 가장 빨리 저온으로 안정되고, 작동주파수 45Hz, 55Hz, 60Hz 순으로 저온으로 안정되는 시간이 많이 소요 되었으며, 특히 작동주파수 45Hz, 50Hz, 55Hz에서는 최저도달온도가 약 50K로써 거의 비슷하지만, 60Hz에서는 최저도달온도가 약 63K이었다.
- (5) 충전압력 14kgf/cm²G 일 때, 냉동능력과 성능계수는 작동주파수가 50Hz에서 가장 높았으며, 최저도달온도는 49K, 72K에서의 냉동능력은 0.5W, 성능계수는 0.014이었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] R.E. McMurray, Jr., "Infrared Detector Requirements which drive Cryogenic Development", Cryogenics 1994, Vol. 34, No. 5, 1994.
- [2] R.M. Rawlings, etc., "Linear Drive Stirling Cryocoolers: Qualification and Life Testing Results", Cryocoolers 8, p.121, 1995.
- [3] A.K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical Society, pp.1136-1141, 1979
- [4] S.J.Park, etc., "An Experimental Study of Split-type Free Piston and Free Displacer Stirling Cryocooler", Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity & Cryogenics, 2000

- [5] Y.J.Hong, etc., "A Simple Analysis of Split-type Free Piston and Free Displacer Stirling Cryocooler", Korea-Japan Joint Workshop on Applied Superconductivity & Cryogenics, 2000

저 자 소 개



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



홍용주 (洪溶柱)

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



김효봉 (金孝峰)

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 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원



김양훈 (金良勳)

1972년 4월 27일생. 1998년 제주대 공대 기계공학과 졸업, 2001년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 한국기계연구원 위촉연구원



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



이기백 (李起白)

1938년 8월생. 1964년 서울대 물리학과 졸업, 1968년 경북대 대학원 졸업(석사), 1983년 동대학원 졸업(박사), 현재 부산대학교 공과대학 기계공학부 교수