

적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 실험적 연구

박성제* · 홍용주* · 김효봉* · 고득용* · 김종학** · 유병건**

Experimental Study on the Stirling refrigerator for Cooling of Infrared Detector

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

Key Words: Stirling refrigerator(스테링냉동기), Linear compressor(선형압축기), Displacer(왕복기), Regenerator(재생기), Infrared detector(적외선 센서)

Abstract

A Stirling cryocooler is relatively compact, reliable, commercially available, and uses helium as a working fluid. The FPDFD Stirling cryocooler consists of two compressor pistons driven by linear motors which makes pressure waves and a pneumatically driven displacer piston with regenerator. A free piston and free displacer(FPDFD) Stirling cryocooler for cooling infrared and cryo-sensors is currently under development at KIMM(Korea Institute of Machinery & Materials). In order to evaluate the feasibility of using a linear motor driving cryocooler, prototype Stirling cryocooler with a nominal cooling capacity of 0.5W at 80K was designed, fabricated and tested. The prototype has achieved no load temperature of 51K and cooling power of 0.33W.

1. 서론

저온센서용 77K급 극저온 발생장치는 G-M 극저온 냉동기, 스테링(Stirling) 극저온 냉동기, Joule-Thomson 극저온 냉동기 및 맥동관 극저온 냉동기 등이 있으며, 주로 적외선 센서 및 초전도 필터 냉각용으로 활용되고 있다.

이러한 응용분야에서 요구되는 극저온 발생장치의 필요 조건은 (1)냉각온도, (2)냉동부하, (3)신뢰성, (4)진동레벨, (5)온도제어성, (6)Cooldown 시간 및 입력, (7)체적, 중량, (8)설치환경 및 비용 등으로서 충분한 검토가 필요하다.

약 15년전에는 이러한 응용들은 수백 시간의 수명을 가지는 크랭크 구동 스테링(Stirling)냉동

기 또는 매작동시마다 고압가스를 재충전해야만 하는 open cycle Joule-Thomson 냉동기를 주로 사용했다. 최근의 지난 몇 년간은 더 높은 신뢰성에 대한 필요성에 부응하여 약 5000시간의 수명을 가지는 선형압축기(linear compressor) 구동 스테링 냉동기를 개발하게 되었고, 이 장치들은 open cycle Joule-Thomson 냉동기들을 대체하고 있다.

본 연구에서는 기존의 극저온 냉동기에 비해 저진동, 낮은 소요동력, 소형 경량, 충분한 내구성 등의 장점을 가지고 있는 선형압축기형(linear compressor type) 스테링 극저온 냉동기를 개발하기 위한 설계, 제작 및 성능시험 결과를 제시하고자 한다.

2. 스테링 냉동기 설계

스테링 극저온 냉동기는 압축부와 팽창부로 구

* 한국기계연구원 열유체환경연구부
Email : sjpark@kimm.re.kr
TEL:(042)868-7394 FAX:(042)868-7335
* 우영기술원

성되며, 압축부는 내·외부 요크, 실린더, 피스톤, 코일, 스프링과 전류입력단자 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 재생기를 포함한 왕복기(displacer), 왕복기 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 등온 팽창과정과 압축부로 작동가스가 이동하는 등적 과정으로 이루어진다.

Fig. 1은 FPDFD 스테링 냉동기의 3차원 도면을 보여주고 있다.

적외선 센서 냉각용 스테링 극저온 냉동기에 요구되는 사양을 Table 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 Table 2에 나타내었다.

구동기구로서는 극저온에서 고화되는 물질이 작동공간에 없는 Oil free화가 용이한 구조가 바람직하다. 모터는 작동주파수와 구동력의 조절이 가능하고, 측력(side force)이 적은 선형 압축 형태가 적당하다. 또한 지지구조 및 베어링은 접촉을 최소화 하고 가동부인 피스톤과 팽창기를 실린더 중심에 유지하는 방식이 요구되며, 제어성

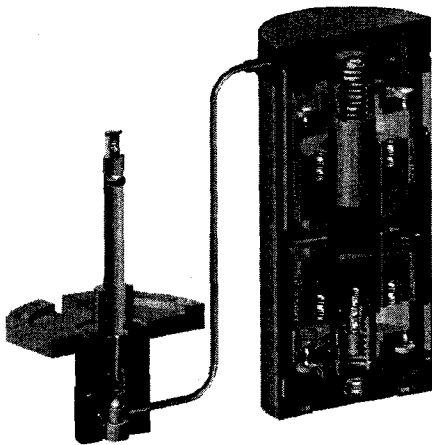


Fig. 1 3-D design of the Stirling cryocooler

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 |

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 |

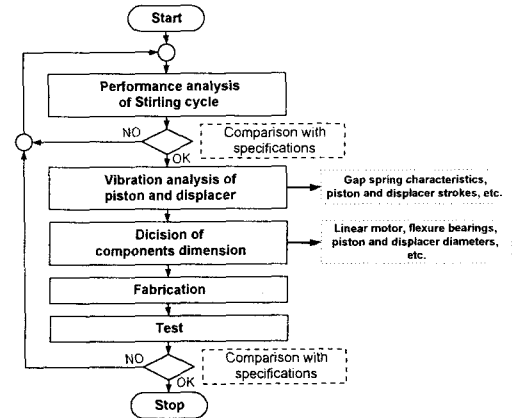


Fig. 2 Design Flow chart

에 관해서는 냉각면 온도를 일정하게 유지하는 변위 제어 방식을 채택한다.

Free piston free displacer 형 스테링 극저온 냉동기의 설계는

- (1) 냉동능력을 기초로 한 열역학적 검토에 의한 각 주 크기와 주파수, 행정 등의 구동 조건을 결정
- (2) 구동 조건을 만족하기 위한 진동계의 검토에 의한 피스톤 및 팽창기의 구동력 결정

(3) 결정된 구동력을 얻기 위한 리니어 모터 사양 및 리니어 모터에서 발생하는 반경 방향 힘을 지지하는 베어링계 사양 결정의 순서로 검토한다. 본 설계 순서를 정리하여 Fig. 2에 나타내었다.

3. 스테링 냉동기 제작

3.1 압축기

압축기는 순철로 된 바깥쪽 yoke와 안쪽 yoke, linear motor와 피스톤, 스프링 등으로 이루어져 있다. Linear motor는 SmCo 또는 NdFeB로 제작된 영구자석과 코일로 구성되어 있으며, yoke는 탄소 함유량이 0.019%인 순철로 제작되었고 피스톤은 Cu(20%) + W(80%)의 재료로 제작되었다.

Linear motor는 원통형 moving coil type이고, 영구자석은 6세그먼트로 각각 반경방향으로 자화되어 있으며, 영구자석의 표면자속밀도는 세그먼트 중앙에서 0.17[Tesla]이었다. 또한 코일의 저항은 1.692[Ω], 인덕턴스는 611[μH]이었다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 linear motor의 자화회로와 코일의 assembly를 보여주고 있으며, Fig. 5는 스테링 극저온 냉동기의 압축기 시작품을 보여주고 있다.

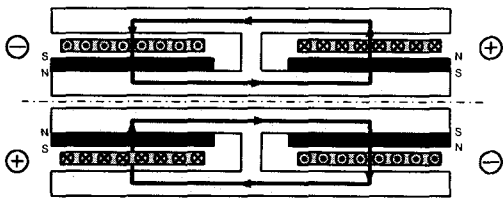


Fig. 3 linear motor의 자화회로

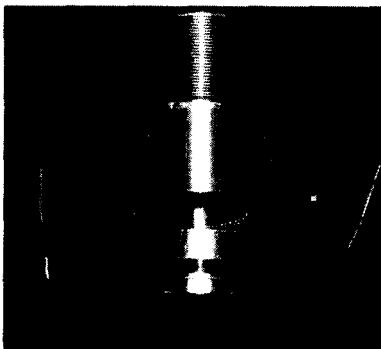


Fig. 4 Coil assembly

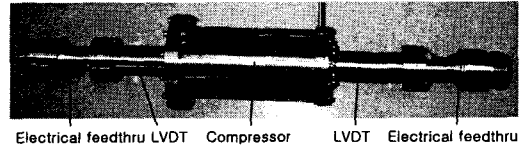


Fig. 5 Linear compressor

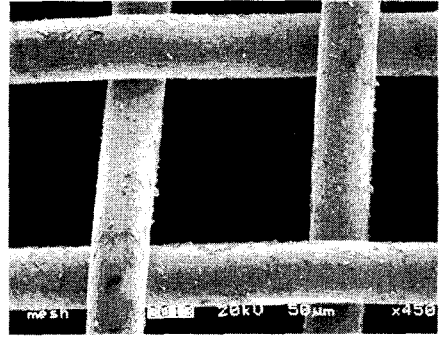


Fig. 6 Regenerator

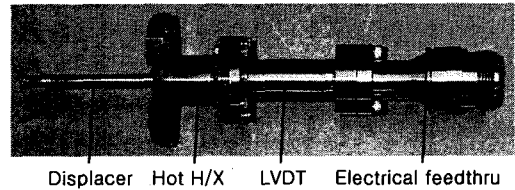


Fig. 7 Expander

3.2 냉각부

냉각부는 재생기를 채워넣은 왕복기와 실린더, 스프링, 고온 열교환부 등으로 이루어져 있다.

재생기는 SUS mesh(#200 ~ #300) wire cutting으로 제작되어 약 550여장 적층으로 쌓여 있으며, 왕복기는 내마모성이 강한 Teflon seal이 고온부와 저온부에 각각 한 개씩 부착되어 있고, 고온 열교환부는 무산소동으로 제작되었다. Fig. 6은 재생기의 SEM 사진을 보여주고 있으며, Fig. 7은 팽창기 시작품을 보여주고 있다.

3.3 가공 및 조립

조립을 위한 공정으로써 가장 중요한 가공 기술은 용접과 브레이징 기술이다. 스테링 냉동기에 있어서의 용접은 레이저용접과 전자빔용접이 가능한데, 전자빔 용접은 자기력선이 존재하는 지역에서는 정확한 용접이 힘들기 때문에 주로 Nd-Yag 레이저 용접으로 가공하였다.

또한 브레이징은 용접재료의 산화방지를 위하여 진공로 브레이징이나 수소 분위기 브레이징으로 하였다.

4. 성능시험 및 결과 고찰

4.1 성능시험장치

Fig. 8은 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 외벽으로부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super-insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 스테링 냉동기와 조립된 진공용기는 로타리 진공펌프를 사용하여 약 10^{-2} 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 일정 온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다. 또한 압축기 셀, 연결관, 왕복기 고온부와 대기에 열전대 T type을 부착하여 온도변화를 측정하였다.

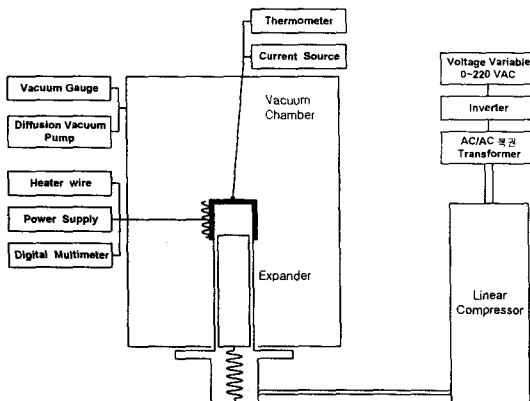


Fig. 8 Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

또한 작동주파수와 입력전류, 전압의 조절은

Fujitsu사의 AC power supply를 사용하였으며, 실험에 사용된 스테링 냉동기의 코일에는 입력전류 및 전압에 각각 4A, 10.2V의 한계가 있기 때문에 그 이상 넘지 않도록 조절 하였다.

4.2 결과 및 고찰

Fig. 9는 스프링 상수 0.0921kg/mm일 때, mesh 수를 변경시키며, 충전압력에 따른 압축기의 공진주파수 특성을 측정한 결과이다. Mesh 수에 따른 일정한 경향은 없으나 대체로 충전압력이 12kg/cm²에서 15kg/cm² 사이 일 때, 압축기의 공진주파수는 작동주파수인 50Hz에 가까운 경향을 보였다.

Fig. 10과 Fig. 11은 KIMM에서 제작된 스테링 극저온 냉동기 시작품의 냉각특성과 냉동능력을 측정한 결과와 기존의 스테링 극저온 냉동기의 냉각특성과 냉동능력을 측정한 결과를 비교한 그림이다. 본 연구에서 설계, 제작된 스테링 극저온 냉동기의 경우, 77K에 도달하는 시간이 약 3분 정도 소요되어 기존 제품과 거의 동등한 성능을 가지며, 최저도달온도는 53K로서 7K 낮고, 77K에서의 냉동능력이 0.33W로 기존 제품의 0.3W 보다 높게 나타났다.

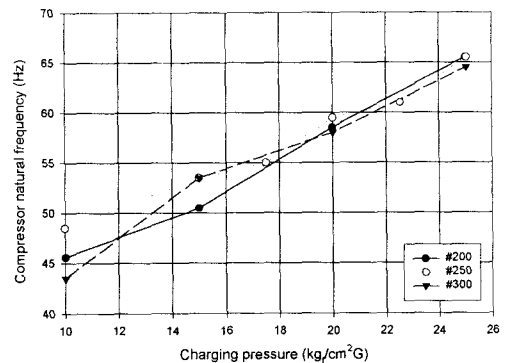


Fig. 9.31 Natural frequency of compressor with charging pressure (spring constant : 0.0921kg/mm)

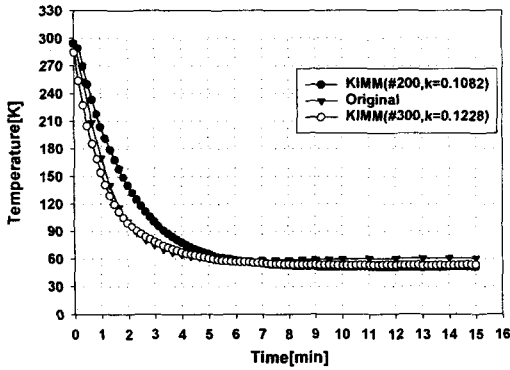


Fig. 10 Cooldown characteristics

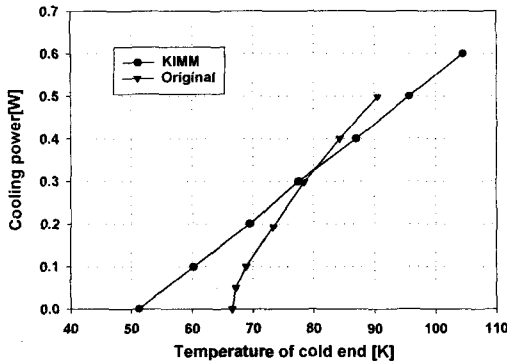


Fig. 11 Cooling load

5. 결론

적외선 센서 냉각용 소형 1W급 냉각능력의 FFPD(Free Piston, Free Displacer) 방식 스테링 냉동기를 개발하기 위하여 선형압축기 및 냉각기를 설계, 제작하고 성능시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스테링 극저온 냉동기를 개발하기 위해 성능해석을 수행하고, 압축기와 팽창기를 설계, 제작하였다.

(2) 공진주파수 특성은 Mesh 수에 따른 경향은 일정하지 않으나 충전압력의 증가에 따라 증가하고, 대체로 충전압력이 $12\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $15\text{kg}/\text{cm}^2$ 사이 일 때, 압축기의 공진주파수는 작동주파수인 50Hz에 가까운 경향을 보였다.

(3) 본 연구에서 설계, 제작된 스테링 극저온 냉동기의 경우, 77K에 도달하는 시간이 약 3분 정도 소요되어 기존 제품과 거의 동등한 성능을 가졌다.

(4) 또한 최저도달온도는 53K이었고, 77K에서의 냉동능력이 0.33W로 기존 제품의 0.3W 보다 높게 나타났다.

후기

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

참고문헌

- (1) A.K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical Society, 1979, pp.1136-1141.
- (2) 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
- (3) Y.J.Hong, etc., "A simple analysis of split-type free piston, free displacer Stirling Cryocooler", Korea-Japan Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2000.
- (4) Y.J.Hong, etc., "Study of Stirling Cryocooler Performance with different length of Split tube", Proceedings, KIASC Conference 2001, Mooju, pp. 37-40
- (5) S.J.Park, etc., "Study of KIMM-E1 Stirling Cryocooler Performance with different Charging Pressure", Proceedings, KIASC Conference 2001, Mooju, pp. 33-36.
- (6) Y.J.Hong, etc., "Theoretical Study of Compression Performance with gap of linear compressor for Stirling Cryocooler", Proceedings, KIASC Conference 2001, Mooju, pp. 149-152.