

## 충진압력에 따른 KIMM-E1 스테링 극저온 냉동기에 관한 연구

박성제\*, 홍용주\*, 고득용\*, 김효봉\*, 오군섭\*, 엄한길\*, 김종학\*\*  
\*한국기계연구원, \*\*(주)우영

### Study of KIMM-E1 Stirling Cryocooler Performance with Different Charging pressure

S.J. Park\*, Y.J. Hong\*, D.Y. Koh\*, H.B. Kim\*, K.S. Oh\*, H.K. Yeom\*, J.H. Kim\*\*  
\*Korea Institute of Machinery & Materials, \*\*Wooyoung

sjpark@kimm.re.kr

**Abstract** - A free piston and free displacer(FPPD) Stirling cryocooler for cooling infrared and cryo-sensors is currently under development at KIMM(Korea Institute of Machinery & Materials). The FPPD Stirling cryocooler employs 1) the Stirling cycle for refrigeration, 2) linear motors for driving the cryocooler, 3) spring and gas support systems, and 4) fine gap for clearance seals. It is the most suitable design for a mechanical cryocooler utilized in night vision environment. The experimental results show KIMM-E1 Stirling cryocooler (with expander manufactured by KIMM) has the higher cooling power and faster response time at optimum charging pressure.

## 1. 서 론

적외선 센서 냉각용 극저온 냉동기는 미국과 유럽 등지의 일부 제작 업체가 시장을 점유하고 있으며 매달 수천 개의 냉동기가 공급되고 있다. 약 15년전에는 이러한 군사적 응용들은 수백 시간의 수명을 가지는 크랭크 구동 스테링(Stirling)냉동기 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) 구동스텝링 냉동기를 개발하게 되었고, 이 장치들은 open cycle Joule-Thomson 냉동기들을 대체하고 있다.

적외선 센서 냉각용 극저온 냉동기의 필요 조건은 (1)냉각온도, (2)냉동부하, (3)신뢰성, (4)진동레벨, (5)온도제어성, (6)Cooldown 시간 및 입력, (7)체적, 중량, (8)설치 환경 및 비용 등으로서 충분한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 극저온 냉동기에 비해 저진동, 낮은 소모동력, 소형 경량, 충분한 내구성 등의 장점을 가지고 있는 선형압축기형(linear compressor type) 스테링 극저온 냉동기를 개발하기 위해 팽창부(expander)를 설계 제작하여 스테링 냉동기의 충진압력에 따른 무부하 실험과 부하 실험을 수행하고 이에 따른 특성 변화를 평가하고자 한다.

## 2. 본 론

Fig. 1은 FPPD 스테링 냉동기의 3차원 도면을 보여주고 있다. 스테링 냉동기는 크게 압축부와 팽창부로 구분되어 있고, 압축부는 실린더, 피스톤, 코일과 마그넷 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 왕복기와 재생기, 왕복기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다.

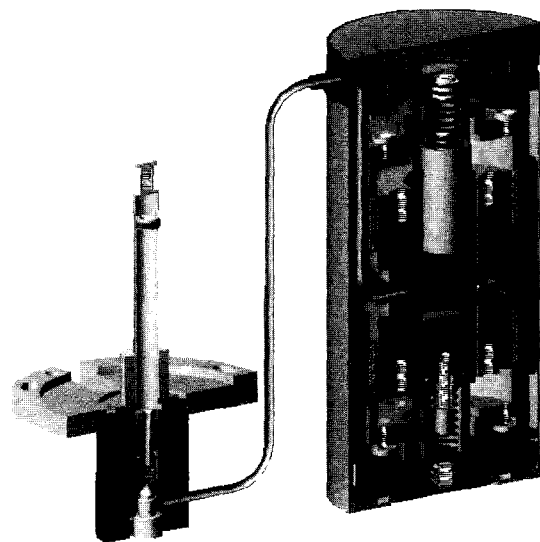


Fig. 1. 3-D design of the Stirling cryocooler

피스톤은 moving coil type으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되고, 이 피스톤은 가

스압력을 발생하여 스프링으로 연결된 왕복기를 작동한다. 가스 스프링은 왕복기와 피스톤에 의한 작동과정이 이상적인 사이클에 가깝도록 조절한다. 냉동은 팽창공간에 연결된 cold end 부근에서 발생하고, 왕복기는 피스톤 사이의 공간, split tube내 공간과 왕복기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간으로부터 팽창공간 사이에 가스 유동을 발생시킨다.

### 2.1 실험장치 및 실험방법

Fig. 2는 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.

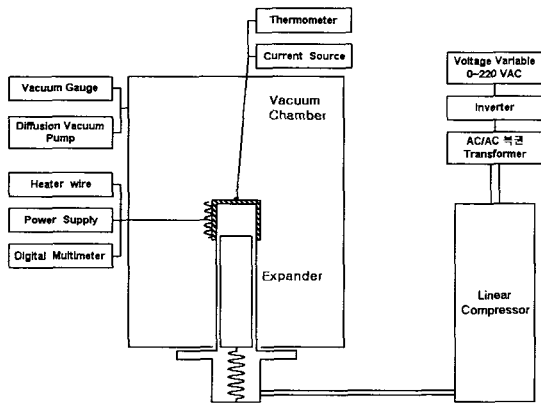


Fig. 2 Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

스테링 냉동기 저온부의 온도는 silicon-diode 센서를 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여  $9.5\Omega$ 의 망가닌 열선을 저온부에 감고 전류를 흘려 일정 온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동 능력으로 환산하였다. 또한 압축기 헬, 연결관, 왕복기 고온부와 대기에 열전대 T type을 부착하여 온도변화를 측정하였다.

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 조절 하였다.

스테링 냉동기의 성능시험은 선형압축기의 작동주파수가 50Hz일 때, 충전압력을 변경할 때의 최저도달온도를 측정하고, 각 충전압력에서의 냉동능력을 측정함으로써 무부하 실험과 부하 실험을 병행하였다.

### 2.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 무부하 조건에서 충전압력에 따른 스테링 냉동기 cold end 에서의 cool down 특성을 비교한 그림이다. 최적충전압력에서 가장 빨리 저온으로 안정되고, 최적충전압력에 대한 충전압력비(r)가 1.25, 0.75, 1.5 순으로 저온으로 안정되는 시간이 많이 걸린다는 것을 알 수 있다. 최적충전압력에서 77K까지 도달하는 시간은 약 5분 30초 걸렸고 최저도달온도는 75K이었으며, 온도강하속도는 냉동능력과 관계가 있다. 충전압력의 변화에 따라 냉동 특성이 달라지는 것은 충전압력에 따라 가스 스프링 상수가 달라져 압축기의 공진주파수가 달라지고 또한 피스톤과 왕복기 사이의 위상차가 달라지기 때문인 것으로 판단된다.

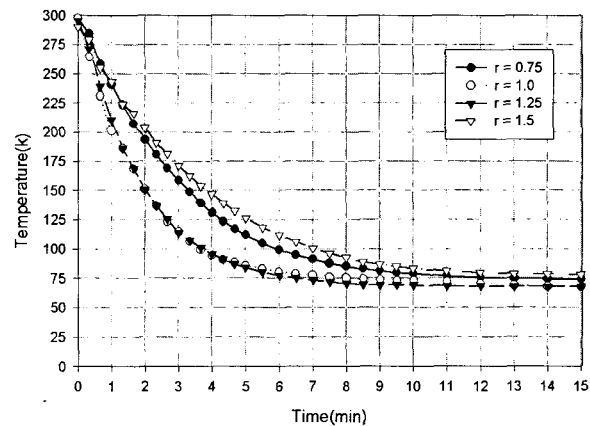


Fig. 3. Cooldown characteristics at no load condition

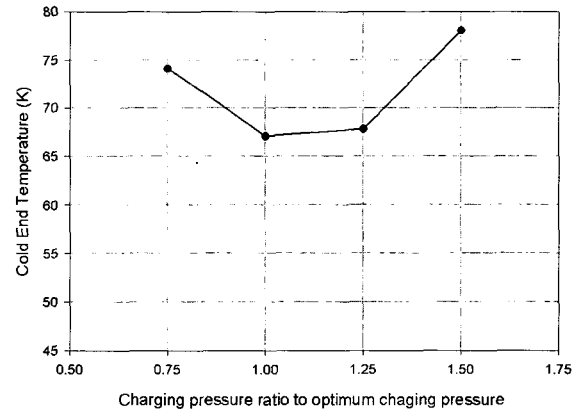


Fig. 4. No load temperature

Fig. 4는 충전압력에 따른 cold end 에서의 최저온도를 나타내고 있다. 최적충전압력에서 67K로서 가장 낮음을 알 수 있으며, 최적충전압력에 대한 충전압력비 1.25, 0.75, 1.5에서 최저온도는 각각 68K, 74K, 78K 이었다.

Fig. 5는 충전압력에 따라 시스템에 입력되는 전류와 전압에 의한 저항의 변화를 나타낸다. R이 최대인 충전압력에서 전류와  $P_{loss}$ 가 최소가 되며, 이 때의 충전압력은 압축기 피스톤의 공진주파수에 가장 가까운 작동조건이라 할 수 있다.

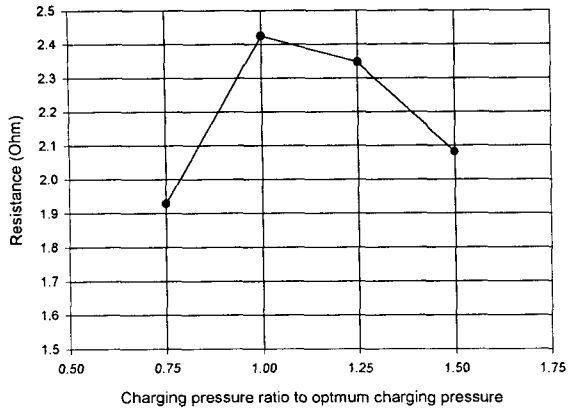


Fig. 5. cryocooler system resistance

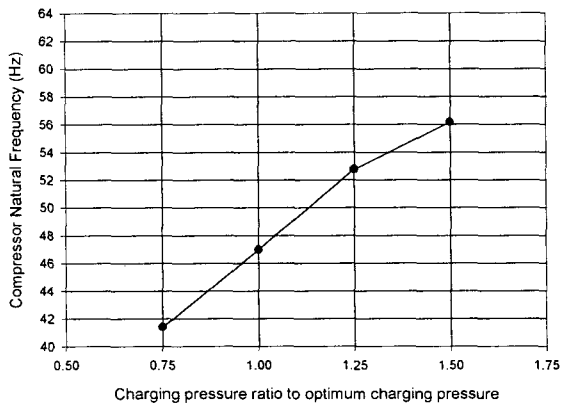


Fig. 6. Compressor natural frequency

Fig. 6은 충전압력에 따른 압축기의 공진 주파수의 변화를 보여주고 있다. 충전압력이 증가함에 따라 가스 스프링 상수의 영향이 크기 때문에 압축기의 공진주파수가 증가하는 것을 알 수 있으며, 최적충전압력에 대한 충전압력비가 1 ~ 1.25 사이에서 공진주파수가 50Hz이고, 이 때 스테어링 극저온 냉동기의 최적 작동주파수가 됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 충전압력에 따른 cooling load의 변화를 나타내고 있다. 측정된 최적충전압력에 대한 충전압력비는 0.75, 1.0, 1.25, 1.5이며, 최적충

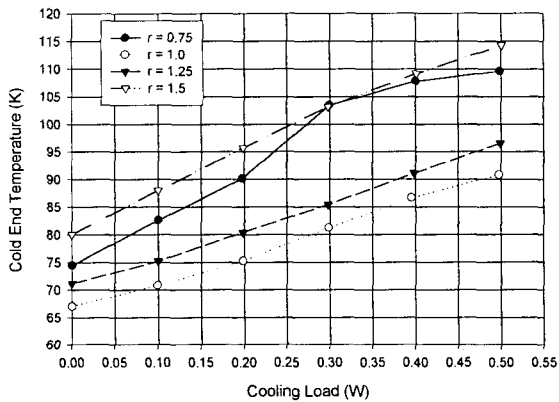


Fig. 7. Cooling load

진압력에 대한 충전압력비가 1.0에서 가장 높은 냉동능력을 보여주었다. 최적충전압력에서 77K에서의 냉동능력은 약 0.25W이었다.

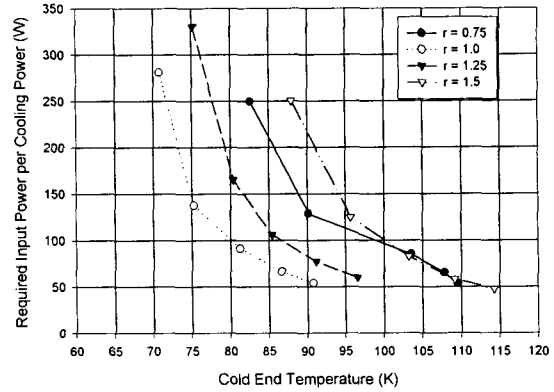


Fig. 8. Required input power characteristics

Fig. 8은 Cold end 부에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력을 최적충전압력에 대한 충전압력비에서 나타내고 있다. Cold end 부에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력은 온도가 증가함에 따라 감소하였으며 최적충전압력에서 가장 낮았다.

Cold end 부 온도 80 K 에서 1W 의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력이 최저인 최적충전압력에서의 입력은 약 100W로 나타났다.

Fig. 9는 cold end부를 80K, 90K로 일정하게 하였을 때, 충전압력에 따른 냉동능력의 변화를 보여주고 있다. Cold end부의 온도가 각각 90K, 80K 일 때 최대 냉동능력을 보여주는 최적충전압력에 대한 충전압력비는 각각 1.1, 1.05로 조금씩 낮아지고 있다는 것을 알 수 있는데, 그 충전압력에서 압축기의 피스톤과 팽창부의 왕복기 사이의 위상차가 45° 이기 때문이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 압축기의 압력비에 따른 최저온도의 변화를 보여 주고 있다. 충전압력은 최적충전압력으로 하였고, 압력비는 압축기에의 인가 전압에 의해 변화 시켰으며, 압력비가 증가함에 따라 최저온도는 낮아짐을 알 수 있다

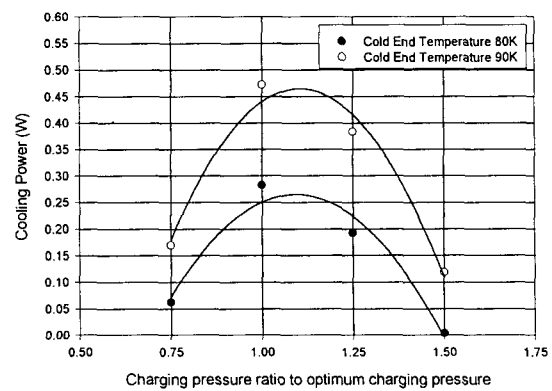


Fig. 9 Cooling power characteristics

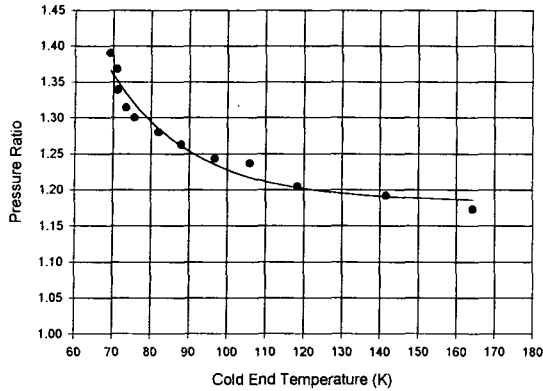


Fig. 10. Pressure ratio variation

### 3. 결 론

스터링 극저온 냉동기의 팽창부를 자체 설계, 제작 하여 충전압력을 변화 시키며 무부하 실험과 부하 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 스테링 극저온 냉동기는 충전압력에 따라 압축기의 공진주파수와 피스톤과 왕복기의 위상차가 많이 변하여 최저온도에 영향을 주기 때문에 충전압력이 매우 중요한 변수라는 것을 알 수 있었다.
- (2) 스테링 극저온 냉동기 시스템의 저항이 최대인 충전압력에서 전류와  $P_{loss}$ 가 최소가 되며, 이 때의 충전압력은 작동주파수 50Hz에서 압축기 피스톤이 공진이 되는 고유진동수라는 것을 알 수 있었다.
- (3) 충전압력이 증가함에 따라 압축기의 공진주파수가 증가하는 것을 알 수 있으며, 최적충진압력에 대한 충전압력비가 1 ~ 1.25 사이에서 공진주파수가 50Hz이고, 이 때 스테링 극저온 냉동기의 최적 작동주파수가 됨을 알 수 있다.
- (4) Cold end 부에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력은 온도가 증가함에 따라 감소하였으며 Cold end부 온도 80 K에서 1W의 냉동능력을 발생하기 위해 요구되는 입력이 최저인 최적충진압력에서의 입력은 약 100W로 나타났다.
- (5) 최대 냉동능력을 보여주는 충전압력에서 압축기의 피스톤과 팽창부의 왕복기 사이의 위상차가 45° 라는 것을 알 수 있었다.
- (6) 최적충진압력에서의 최저도달온도는 67K이었으며, 77K에서의 냉동능력은 약 0.25W이었다.

### (참 고 문 헌)

[1] A. Cardin, D. Feger, and D. Verbeek, "Space Qualification Program of a Signal USFA Tactical Cooler for the Mars 1996

Apace Mission", Cryocoolers 8, p.137, 1995.

[2] R.E. McMurray, Jr., "Infrared Detector Requirements which drive Cryogenic Development", Cryogenics 1994, Vol. 34, No. 5, 1994.

[3] R. Narayan, "Dual Opposed Piston Stirling Cryocoolers for IR Systems", Cryocoolers 8, p.129, 1995.

[4] 박성제의 3인, "저온센서 냉각용 맥동관 냉동기의 평가", 공기조화 냉동공학회 '98동계학술대회 논문집, p.84, 1998

[5] 박성제, 고득용, "적외선 소자 냉각용 극저온 냉동 장치", 한국기계연구원 기계와 재료, 제 10권, 제 2호, p.92, 1998

[6] 고득용의 4인, "적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 성능시험", '99 한국초전도, 저온 공학회 학술대회 논문집, p.202.8, 1999

[7] 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.

[8] S.J.Park, etc., " An experimental study of split-type free piston, free displacer Stirling Cryocooler", Korea-Japan Workshop on Applied Superconductivity and Cryogenics, 2000.