

## 적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 성능시험

고득용, 박성제, 김효봉, 염한길, 김홍국\*, 김남환\*  
한국기계연구원, 국방과학연구소\*

### Performance Test of the Stirling Cryocooler for Cooling of the Infrared Detectors

D.Y. Koh, S.J. Park, H.B. Kim, H.K. Yeom, H.K. Kim\*, N.H. Kim\*  
Korea Institute of Machinery & Materials, Agency for Defence Development\*

dykoh@netra.racer.or.kr, sjpark@mailgw.kimm.re.kr

**Abstract** - This paper presents operating process of the Stirling cryocooler and results obtained with the performance test for Signaal Usfa UP 7075 Stirling cryocooler. An experimental study was carried out to develop the more reliable Stirling cryocooler. The cooldown characteristics and load characteristics are described. The lowest temperature measured in the Stirling cryocooler was 62.5K and the cooling capacity at the optimum operating condition was 0.4W at 77K. At that time, carnot COP was 0.024.

대부분의 물체는 적외선 범위를 넘지 못하는 복사선을 방사하므로 적외선을 검출하는 소자를 사 용함으로써 식별이 가능하다.

적외선 센서는 현재 우주 개발 분야에서 가장 중요하게 응용되고 있는데 이러한 분야에서는 미세한 신호를 검지하기 위해서 배경 열잡음 (background thermal noise)의 저감 및 검지기 감도의 향상을 위해 저온 냉각이 필요하게 된다.

본 연구에서는 신뢰성 높은 적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 개발을 위해 기존의 상용화된 네델란드의 Signaal Usfa 제품에 대한 이해와 성능실험을 통하여 앞으로의 연구방향과 가능성을 모색하고자 한다.

## 1. 서 론

지금까지 극저온 냉동기의 가장 주요한 응용은 야간 투시경과 미사일 유도를 위한 적외선 센서의 냉각 등의 군사적 이용이었다. 이 때 사용되는 적외선 센서의 재료들은 HgCdTe, InSb와 PtSi이었고, 약 80K에서 0.1 ~ 1W정도의 냉동 능력이 요구되었다. 현재 미국과 유럽 등지의 일부 제작 업체가 이 시장을 점유하고 있으며 매달 수천 개의 냉동기가 공급되고 있다. 약 15년 전에는 이러한 군사적 응용들은 수백 시간의 수명을 가지는 closed-cycle 스테링(Stirling)냉동기 또는 매작동시마다 고압가스를 재충전해야만 하는 open cycle Joule-Thomson 냉동기를 사용했다. 최근의 지난 몇 년간은 더 높은 신뢰성에 대한 필요성에 부응하여 약 5000시간의 수명을 가지는 스테링 냉동기를 개발하게 되었고, 이 장치들은 open cycle Joule-Thomson 냉동기들을 대체하고 있다.

적외선이란 파장이 가시광선 보다 길고 마이크로파 보다 짧은 0.75 $\mu$ m이상의 전자기파 (Electromagnetic wave)로서 1800년경 William Herchel경에 의해 발견되었는데 지구상에 존재하는 0K이상의 모든 물체는 그 온도에 해당하는 복사선을 방출한다. 지구상에 존재하는

## 2. 스테링 냉동기의 개요

### 2.1 냉동기의 요구사항

Fig. 1은 적외선 검출기 냉각의 조립도이다. 검출기는 이면이 냉각되고 주위로부터의 열 침입을 막기 위해 진공 용기에 넣어진 구성을 하고 있다. 냉각해야 할 열량은 적외선 검출기의 전기적 발열량, 적외선의 입사열량, 진공단열 성능에 의해 결정되는 것이지만, 통상적으로는 0.3 ~ 2W정도로 고려하면 충분한 것 같다.

냉동장치의 필요사양으로서는 저진동일 것, 소요동력이 작을 것, 소형 경량일 것, 충분한 내구성을 가질 것 등이 특히 중요한 사항이다.

적외선 센서 냉각방식으로는 Joule Thomson 냉동기, Gifford-McMahon(GM) 냉동기, Vuilleumier(VM) 냉동기, Stirling 냉동기와 Pulse tube 냉동기 등이 주로 사용되고 있다.

특히 최근에 저온부에 기계적 가동부가 없이 구조가 간단하여 보수가 용이하고, 장시간 운전 에 신뢰성이 높으며 제조비용이 저렴한 Pulse tube 냉동기에 대한 적용 가능성이 높으나 스테링 냉동기에 비해 효율이 낮은 단점이 있어 대부분의 적외선 센서 냉각기로서는 스테링 냉동기가 주류를 이루고 있다. 앞으로의 Pulse tube 냉동기의 연구개발 성과도 주목해볼 만 하다.

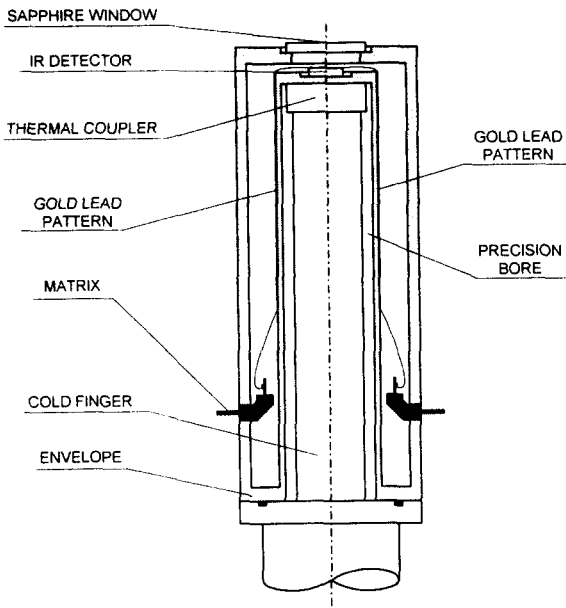


Fig. 1. Infrared detector cooler assembly

적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 생산업체로는 현재 미국의 Hughes, Ball Aerospace & Technologies Corp., BEI, 영국의 Inframetrics, 이스라엘의 Ricor, ICE와 네덜란드의 Signaal Usfa 등이 있다.

### 2.2 스테링 냉동기의 작동과정

Fig. 2에는 스테링 냉동기의 동작원리를 보여주고 있다. 기본 구성은 (1) 냉동부의 실린더, (2) 축냉기를 채운 displacer, (3) displacer 위치를 중립점에 유지시키는 스프링, (4) 냉동부와와의 연결 배관, 그리고 (5) 압축부로 이루어진다. 또한 그림에 PV 선도를 나타내었는데, 기본 사이클은 등온압축, 등적과정, 등온팽창, 등적과정의 4행정으로 이루어져 있다.

(1)의 동작은 시스템 공간내의 헬륨압력을 높이는 압축행정이고, 압축열은 냉각핀에 의해 방열된다(등온압축). 또 이 상태에서의 displacer 위치는 압축과 동반하여 중립점보다 위로 이동하고 있는 상태에 있다.

(2)의 동작은 시스템내의 체적이 최소로 되어 압력이 최대가 되고, 이 시점에서 displacer의 위치는 스프링 작용에 의해 중립점으로 돌아오기 때문에 압축가스는 축냉기를 통과하면서 팽창공간으로 이동한다(등적과정).

(3)의 동작은 압축 피스톤이 내려가서 시스템 공간내의 압력이 감소하고, 동시에 displacer도 아래로 이동하고 있기 때문에 팽창공간내의 체적이 증가하여 팽창이 일어난다. 그리고 외부로부터의 열을 흡수하여 열평형이 되고자 하기 때문에 열부하를 냉각하게 된다(등온팽창).

(4)의 동작은 냉각한 가스의 냉열을 축냉기에 주면서 압축부로 돌아옴과 동시에 displacer도 중립위치로 돌아오기 때문에 가스가 이동

한다(등적과정). 또한 displacer의 구동은 시스템 공간의 압력변화와 spring의 작용에 의해 각 행정의 위상 shift의 동작이 최적이 되도록 설계되어 있다.

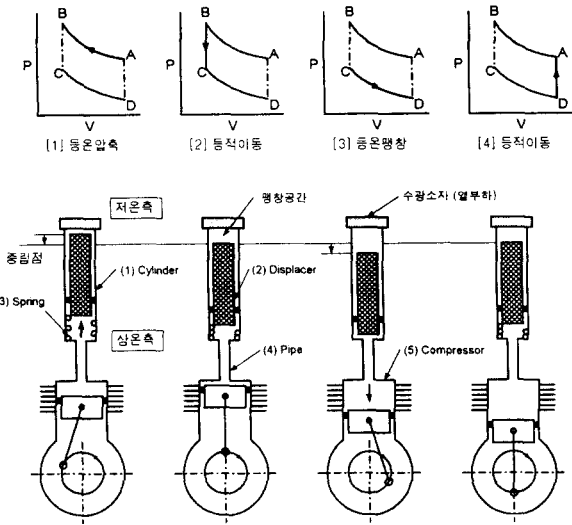
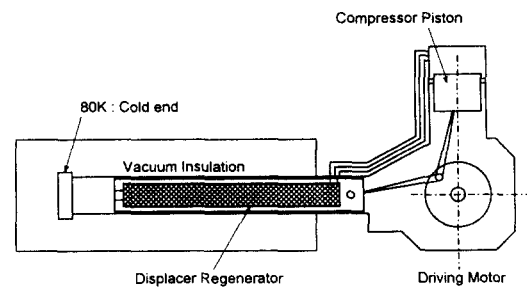
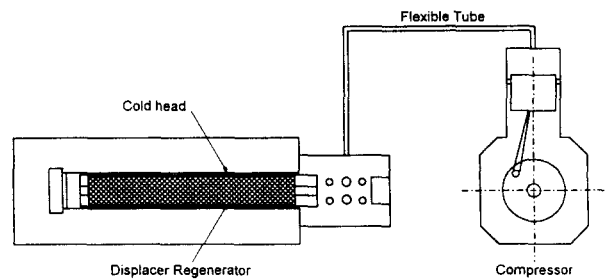


Fig. 2. Operating process of the Stirling cryocooler

적외선 카메라에 적합한 대표적인 형식으로서 Fig. 3(a)와 같은 압축 부분과 냉동부가 크랭크 기구로 연결된 일체형과 Fig. 3(b)와 같이 flexible 배관으로 분리된 형태의 split 형이 있지만 최근에는 수광소자에 대한 압축기의 진동이나 전기적인 영향을 저감할 수 있는 split형이 주류를 이루고 있다.



(a) Integrated type



(b) Split type

Fig. 3. Types of the Stirling cryocooler

스터링 냉동기는 주로 우주와 군사의 목적으로 개발되어 왔기 때문에 고신뢰도와 수명이 항상 해결해야 할 문제로 남아 있었다. 이에 대한 해결책으로 최근에는 linear drive compressor를 이용한 Oxford형 극저온 냉동기가 개발되었다. Oxford형 스테어링 냉동기에서는 모든 dynamic seal이 비접촉의 gap sealing을 사용하고, displacer는 소형 linear motor에 의해 공기역학적으로 작동되므로 수명이 매우 증가되었다.

### 3. 실험장치 및 실험결과

#### 3.1 스테어링 냉동기

Fig. 4는 Signaal Usfa 스테어링 냉동기의 개념도를 보여주고 있다. 스테어링 냉동기는 크게 압축부와 팽창부로 구분되어 있으며, 압축부는 실린더, 피스톤, 코일과 마그넷으로 구성되어 있으며, 팽창부는 왕복기와 재생기, 왕복기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다. 피스톤은 moving coil type으로 작동되는 linear motor에 의해 구동되어 가스압력을 발생하여 스프링으로 연결된 왕복기를 작동한다. 가스 스프링은 왕복기와 피스톤에 의한 과정이 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 가스유동을 발생시킨다.

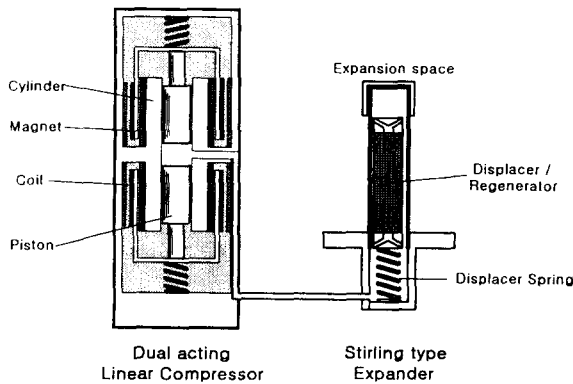


Fig. 4. Schematic diagram of the Stirling cryocooler

실험에 사용된 스테어링 냉동기는 Signaal Usfa의 UP7075 model이며, 압축기 크기는  $\phi 55\text{mm} \times 120\text{mm}$  length이며 실린더 크기는  $\phi 7\text{mm} \times 70\text{mm}$  length로서 현장 작동시간이 약 4,900시간 경과한 제품이다.

#### 3.2 실험장치 및 실험방법

Fig. 5는 스테어링 냉동기 성능시험장치의 개략도를 보여주고 있다. 이 실험에 사용된 진공용기는 길이 160mm, 내경 80mm, 두께 5mm의

스테인레스강이었다. 진공플랜지에 연결된 스테어링 냉동기는 저온부에 온도센서와 heater wire를 부착하고, 진공용기 외벽으로부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 스테어링 냉동기와 조립된 진공용기는 로타리 진공펌프와 diffusion 펌프를 사용하여 약  $10^{-5}$ Torr의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다.

온도는 silicon-diode 센서를 스테어링 냉동기 저온부에 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 망가닌 heater wire를 저온부에 일정한 저항만큼 감고 망가닌선에 전류를 흘려 일정온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다.

스터링 냉동기의 성능시험은 linear compressor의 전압과 작동주파수를 변경할 때의 최저도달온도를 측정하여 최적작동조건을 도출하고, 그 때의 냉동능력을 측정하였다.

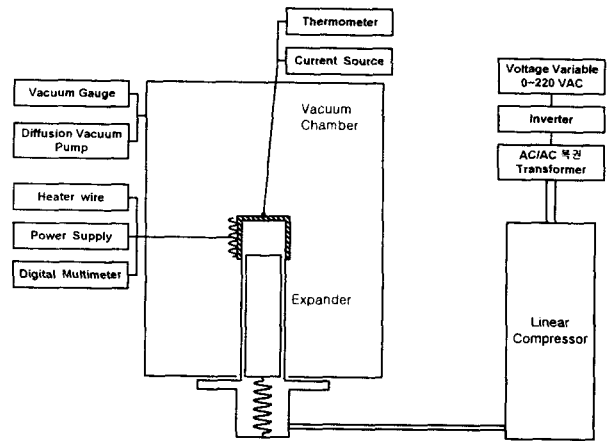


Fig. 5. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler

#### 3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 6은 입력전압 10V, 작동주파수 50Hz일 때 스테어링 냉동기 저온부의 cooldown 특성을 보여준다. 약 5분이 지난 후 온도가 안정되기 시작하였으며, 약 7분이 지난 후 최저도달온도 62.5K에 도달하였다.

Fig. 7은 입력전압을 6V, 8V, 10V로 변경하고, 작동주파수를 40Hz, 50Hz로 변경하였을 때의 스테어링 냉동기 저온부의 최저도달온도 변화를 보여주고 있다. 작동주파수가 40Hz에 비해 50Hz일 때 최저도달온도가 낮게 나타났으며, 입력전압이 높을수록 최저도달온도가 낮게 나타났다. 그러나 입력전압을 약 11V 이상 증가시키거나, 작동주파수를 약 60Hz 이상 증가시키면 linear motor의 작동이 불안정하게 되었다.

Fig. 8은 작동주파수 40Hz와 50Hz일 때 압축기 입력에 따른 최저도달온도의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 40Hz인 경우 매우 비효율

적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 입력전압 10V, 작동주파수 50Hz 일 때 스텔링 냉동기 저온부의 냉동 능력과 Carnot COP를 보여준다. 스텔링 냉동기의 저온부의 온도가 77K일 때 냉동능력은 0.4W, Carnot COP는 0.024로서 적외선 검출기가 정상 작동하는 조건을 만족하고 있다.

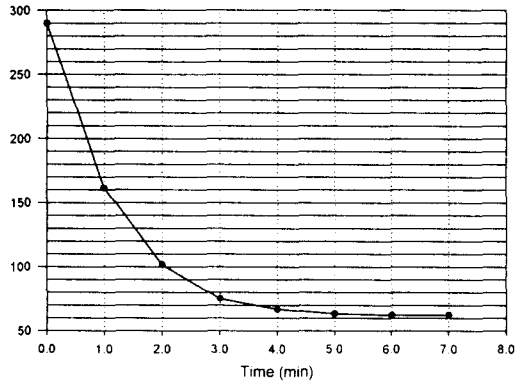


Fig. 6. The cooldown characteristics of the Stirling cryocooler

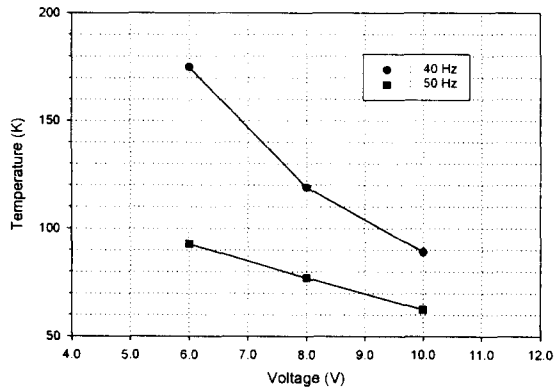


Fig. 7. No load temperature as a function of input voltage and operating frequency

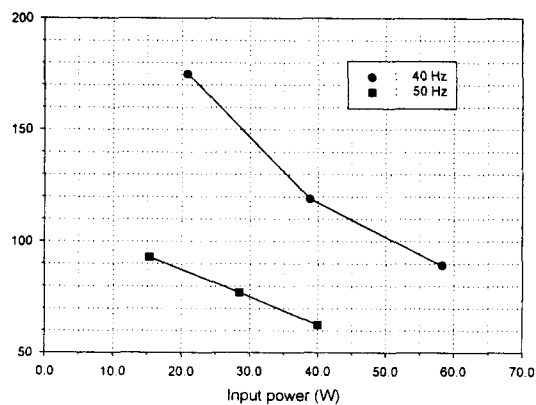


Fig. 8. No load temperature as a function of input power and operating frequency.

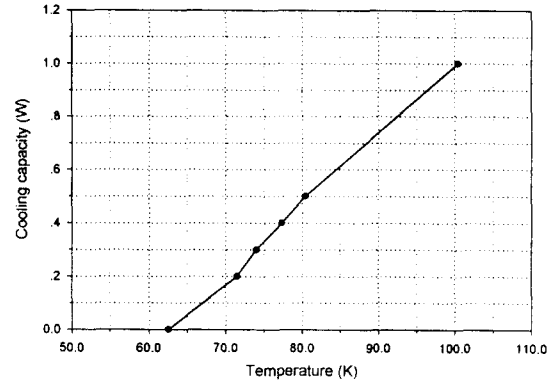


Fig. 9. Load characteristics of the Stirling cryocooler.

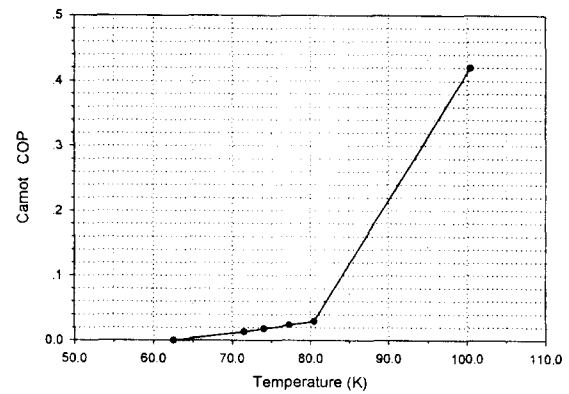


Fig. 10. Carnot COP as a function of the temperature of the coldend

#### 4. 결 론

이상과 같이 적외선 센서 냉각용 스텔링 냉동기의 연구를 위해 상용화된 기존의 스텔링 냉동기에 대한 성능시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 스텔링 냉동기의 입력전압과 작동주파수를 변경시키며 성능측정이 가능하도록 실험장치를 구성하였다.

(2) 스텔링 냉동기 저온부의 cooldown 특성은 약 5분이 지난 후 온도가 안정되기 시작하여 약 7분이 지난 후 최저도달온도 62.5K에 도달하였다

(3) 작동주파수가 40Hz에 비해 50Hz 일 때 최저도달온도가 낮게 나타났으며, 입력전압이 높을수록 최저도달온도가 낮게 나타났다.

(4) 스텔링 냉동기 저온부의 온도가 77K일 때 냉동능력은 0.4W, Carnot COP는 0.024로서 적외선 검출기가 정상 작동하는 조건을 만족하고 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. Cardin, D. Feger, and D. Verbeek, "Space Qualification Program of a Signaal USFA Tactical Cooler for the Mars 1996 Apace Mission", Cryocoolers 8, p.137, 1995.
- [2] R.M. Rawlings, C.E. Granger III, and G.W. Hinrichs, "Linear Drive Stirling Cryocoolers: Qualification and Life Testing Results", Cryocoolers 8, p.121, 1995.
- [3] R.E. McMurray, Jr., "Infrared Detector Requirements which drive Cryogenic Development", Cryogenics 1994, Vol. 34, No. 5, 1994.
- [4] R. Narayan, "Dual Opposed Piston Stirling Cryocoolers for IR Systems", Cryocoolers 8, p.129, 1995.
- [5] 박성제, 고득용, "적외선 소자 냉각용 극저온 냉동장치", 한국기계연구원 기계와 재료, Vol. 10, No. 2, p. 92, 1998.
- [6] 박성제 외, "저온센서 냉각용 맥동관 냉동기의 평가", 공기조화 냉동공학회 '98 동계학술 발표회 논문집, p.84, 1998.