

열상장비용 스테링 극저온 냉동기 특성평가 (I) : 성능시험

박성제, 홍용주, 김효봉, 김양훈*, 이성래**, 이기백*, 나종문***
한국기계연구원, *부산대학교 대학원, **(주)우영, ***서라벌대학

The performance evaluation of Stirling cryocooler for thermal imaging system (II) : Performance test

S.J.Park, Y.J.Hong, H.B.Kim, Y.H.Kim*, S.R.Lee**, K.B.Lee*, J.M.Na***
Korea Institute of Machinery & Materials, *Pusan National University,
Wooyoung Co., LTD, *Sorabol College

sjpark@kimm.re.kr

Abstract - This paper presents the results of a series of performance tests for the Stirling cryocooler. A free piston and free displacer(FPFD) Stirling cryocooler for cooling infrared and cryo-sensors is currently under development at KIMM. Our coolers are specifically designed to work in the thermal imaging device and to meet requirements such as cooling capacity, COP and high reliability. In this work, Stirling cryocooler is designed, manufactured and fabricated, and performance characteristics for the cooling capacity / applied input power and cool down time are investigated. This cooler delivers approximately 0.9W cooling at 80K for 30W ~ 40W of input power. And, It takes approximately 2 minutes to cool down to 80K at the ambient temperature of 23°C.

1. 서 론

적외선이란 파장이 가시광선 보다 길고 마이크로파 보다 짧은 $0.75\mu\text{m}$ 이상의 전자기파(Electromagnetic wave)로서 1800년경 William Herchel경에 의해 발견되었는데 지구상에 존재하는 OK이상의 모든 물체는 그 온도에 해당하는 복사선을 방출한다. 지구상에 존재하는 대부분의 물체는 적외선 범위를 넘지 못하는 복사선을 방사하므로 적외선을 검출하는 소자를 사용함으로써 식별이 가능하다.

적외선 기술은 재래식 전쟁과 비재래식 전쟁에서 군사적인 우월성을 유지하는데 중요한 차별적인 요소로서 갈수록 인정되고 있다. 2001년 9월 11일의 테러 공격은 모든 종류의 적외선 시스템에 대한 필요성을 가속화 시켰다.

적외선 영상은 감소된 시계(가시도)에서의 야간 작동 또는 목표물 획득을 위해 다양한 군사적인 응용에 이용된다. 여러 가지의 응용분야에는

지상 감시(ground-based surveillance), 무기 야간 조준(weapon night sights)과 운전자 시야(driver's vision) 향상기(enhancer), 비행기 항해/조종과 표적(targeting) 시스템, 탱크와 해군 자체 방어를 위한 화재 제어 시스템, 정밀 미사일 유도(수색기), 그리고 전술 전략적인 감시와 미사일 방어 등을 포함한다.

군사이용 이외의 상업적인 적외선 카메라의 응용분야는 의료, 환경, 전자, 소방, 상태 모니터링 등이 있다.

적외선 검지기는 냉각형과 비냉각형으로 나누어지지만 냉각형 적외선 검지기의 온도 분해능이 높고, 장거리 관측이 가능하여 비이동형 군사용으로서는 주로 냉각형이 이용되고 있다.

적외선 영상 시스템은 적외선 검지기의 장수명에 비해 적외선 검지기 냉각용 극저온 냉동기의 수명이 짧아 전체 시스템의 수명을 제한하고 있다. 극저온 냉동기의 수명을 연장시키기 위해 여러 가지의 방안이 제안되어 상용화 되고 있지만 가격과 직접적인 관계가 있기 때문에 현재 국내 적외선 영상 시스템용 극저온 냉동기의 수명은 약 5,000시간이다.

국내에서는 1999년부터 (주)우영과 한국기계연구원이 공동으로 적외선 검지기 냉각용 스테링 극저온 냉동기 개발을 시작하였으며, 설계, 제작 및 성능 실험을 통해 기존의 외국 제품과 동등한 수준에 도달하게 되어 수명과 신뢰성에 대한 연구와 함께 스테링 극저온 냉동기의 상용화를 위해 군사규격에 따른 종합적인 시험이 필요하게 되었다.

시험과정은 아래와 같이 크게 4가지 분류로 나누어진다.

(1) 기본 시험 : 외관검사, 치수, 중량, 무게 중심, 절연/접지, 공급전원주파수, 공급케이블

(2) 성능시험 : 냉각능력/공급입력, 냉각시간, 진동, 누설율, 음향소음, EMI

(3) 환경시험 : 고온동작시험, 저온동작시험, 고온저장시험, 저온저장시험, 온도변화시험, 반복충격시험, 충격시험, 랜덤가진시험, 정형파가진시험

(4) 수명 및 신뢰성 시험 : MTTF

따라서 본 연구에서는 적외선 센서 냉각용 스테어링 극저온 냉동기의 개발 과정과 설계사양을 언급하고, 지금까지 수행된 성능시험중 냉각능력/공급입력 시험과 냉각시간에 관한 시험결과를 제시하고자 한다.

2. 스테어링 극저온 냉동기

Fig. 1은 FPPD(Free Piston Free Displacer) 스테어링 냉동기의 3차원 도면을 보여 주고 있다. 스테어링 냉동기는 크게 압축부와 팽창부로 구분되어 있고, 압축부는 실린더, 피스톤, 코일과 마그넷 등으로 구성되어 있으며, 팽창부는 왕복기와 재생기, 왕복기 스프링과 팽창실린더 등으로 구성되어 있다.

피스톤은 코일 구동형(moving coil type)으로 작동되는 선형모터(linear motor)에 의해 구동되고, 이 피스톤은 가스압력을 발생하여 스프링으로 연결된 왕복기를 구동한다. 가스 스프링은 왕복기와 피스톤에 의한 작동과정이 이상적인 사이클에 가깝도록 조절한다. 냉동은 팽창공간에 연결된 저온부(cold end) 부근에서 발생하고, 왕복기는 피스톤 사이의 공간, 연결관(split tube)내

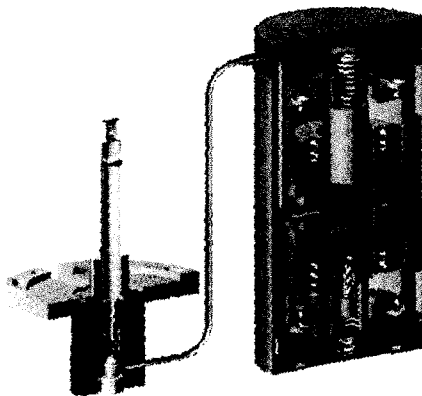


Fig. 1 3-D design of the Stirling cryocooler

공간과 왕복기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간으로부터 팽창 공간 사이에 가스유동을 발생시킨다.

적외선 센서 냉각용 스테어링 극저온 냉동기에 요구되는 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Performance of cryocooler

Items	Specifications
Refrigerating cycle	Stirling cycle
Cooling power	0.8W at 80K(23℃)
MTTF	5,000hours
COP	0.03
Cooldown time	5min
Configuration	Split linear

3. 본 론

3.1 기본시험 : 공급전원주파수

기본시험에는 외관검사, 치수, 중량, 무게중심, 절연/접지, 공급전원주파수, 공급케이블 등이 있는데, 공급전원주파수는 극저온 냉동기를 사용하고자 하는 열영상장비 시스템에서 설계시에 결정되는 사항이기 때문에 규격에 엄격히 맞추어야 한다. 급전원주파수 시험은 기술시험 평가 항목 및 방법(열영상장비(TAS-970K)용 냉각기 결합체)에 의거 시험용 Motor drive에 대해 수행하였으며, 시험방법 및 결과는 Table 1과 Fig. 2와 같다.

Table 1 Applied frequency of the input power

시험 항목	시험 규격	시험방법	시험결과	
			입력 전력	공급전원주파수 (PWM/정현파)
공급 전원 주파수	50Hz ± 0.25 Hz	입력 전원 20W, 30W, 40W에서 주파수 측정	20W	49.99/50.00Hz
			30W	50.00/50.00Hz
			40W	49.98/50.00Hz

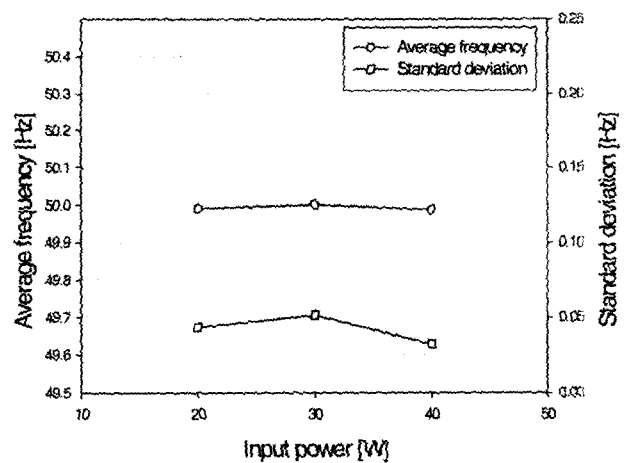


Fig. 2 Applied frequency with the input power (PWM)

3.2 성능시험결과 : 냉각능력/공급입력

냉각능력/공급입력 시험은 기술시험 평가 항목 및 방법에 의거 스테어링 냉동기를 냉각기 결합체에 부착하고, 시험 중에는 simulation dewar의 환경을 진공배기 시스템을 사용 진공으로 유지하도록 하여 수행하였으며, 냉각기 공급전원조건과 시험결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Test results for the dynamic impedance of the Stirling cryocooler

대기온도	최대전압	기준 동하중 임피던스 (50 Hz)	시험 결과
+71 °C	10.5 Vac	2.70±0.25Ω	2.817 Ω
+23 °C	10.2 Vac	2.60±0.25Ω	2.523 Ω
-52 °C	8.0 Vac	1.80±0.25Ω	2.011 Ω

냉각능력 측정은 냉각기 저온부에 부착된 히터 (Heater)의 Lead 선에 의한 영향을 제외한 순수 Heater 공급 전력을 측정하였다. 스텔링 냉동기의 저온부에 부착된 히터선과 리드선의 개념도는 Fig. 3과 같으며, 냉각기의 압축기와 팽창기의 표면온도와 주위의 온도차가 10°C 이하가 되도록 열방출 조건을 맞추어야 하는데, 실험에서는 약 18°C의 온도차가 발생하였다.

Fig. 4는 주위온도 +23°C에서의 최소냉각능력을 보여주고 있다. 점선은 열영상장비에 사용하기 위한 최소허용 냉각능력을 보여주고 있으며, 실선은 본 연구에서 설계, 제작된 스텔링 극

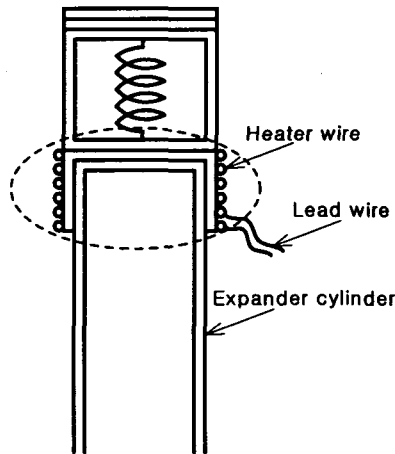


Fig. 3 Schematic diagram of the heater and lead wire

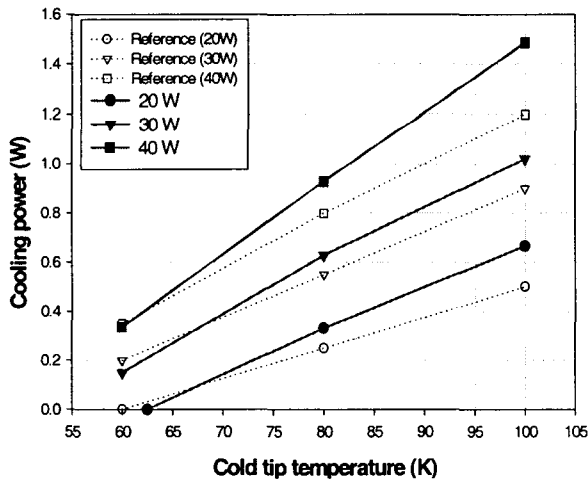


Fig. 4 Minimum cooling capacity at the ambient temperature of 23°C

저온 냉동기의 저온부 온도와 공급입력의 변화에 따른 냉각능력 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5는 저온부 온도 80K에서의 최소냉각능력을 보여주고 있다. Fig. 4와 마찬가지로 점선은 열영상장비에 사용하기 위한 최소허용 냉각능력을 보여주고 있으며, 실선은 본 연구에서 설계, 제작된 스텔링 극저온 냉동기의 주위온도와 공급입력의 변화에 따른 냉각능력 결과를 나타내고 있다. 주위온도가 +71°C와 +23°C일 때는 최소허용 냉각능력보다 높은 냉각능력 결과를 나타내고 있는데, 주위온도가 -52°C일 때에는 최소허용 냉각능력보다 낮은 냉각능력을 보여주고 있다. 이는 냉각기 결합체 부착시 열방출조건(10°C 이하)을 초과하므로써(약 18°C), 열손실이 증대되어 냉각능력 저하를 초래하고, 냉각기 결합체 부착시 팽창기와 dewar 사이의 O-ring(재질: viton)의 열수축에 의해 미소한 누설이 발생하고, dewar의 진공도가 악화되어 기체 열전도 손실의 급증에 의한 열손실 증대로 냉각능력이 저하하는 것으로 판단된다.

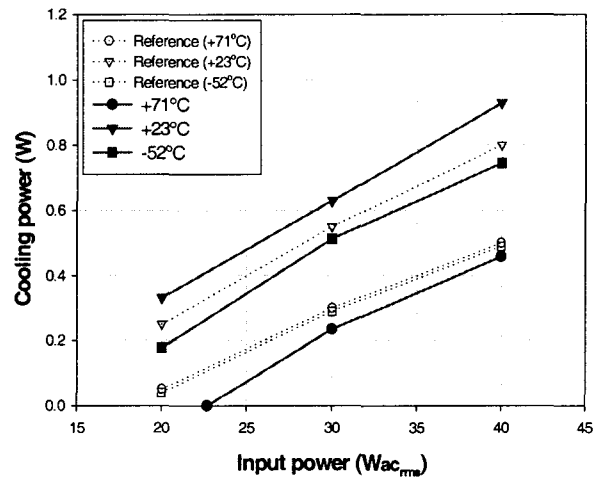


Fig. 5 Minimum cooling capacity with the ambient temperature and input power

3.3 성능시험결과 : 냉각시간

스텔링 극저온 냉동기의 냉각시간은 저온부의 열용량에 의해 많은 차이를 가져온다. 열영상장비에 사용되는 스텔링 극저온 냉동기 저온부의 열용량 기준은 아래와 같다.

- 주위온도 -52 °C에서 340 J
- 주위온도 +23 °C에서 550 J
- 주위온도 +71 °C에서 675 J

Fig. 6 서 점선으로 나타난 그래프가 열용량 조건에 맞추어 시험했을 때의 최대 냉각시간을 보여주고 있다.

본 연구에서 수행한 냉각시험은 열용량 부착(납땀)시 접합 재질간의 냉각속도 차이로 인하여 냉각기의 저온부(cold tip)에서 열변형이 발생하여 냉각기의 손상이 우려되어 부가 열용량을 부착하지 않고 기본 형태를 유지한 채로 수행하였

다.

Fig. 7 주위온도에 따른 80K 까지의 냉각시간의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6과 Fig. 7서 알 수 있는 바와 같이 스텔링 냉동기의 저온부 온도가 80K 까지 도달하는 시간은 주위온도가 +72℃ 일 때는 약 3분이 소요되는데 반해 주위온도가 +23℃, -52℃ 일 때는 각각 약 2분과 1분 50초 정도 소요되었다. 부가 열용량을 부착하지 않은 상태로 냉각 시간 시험을 수행하였으나 Fig. 4와 Fig. 5의 냉각능력 시험결과로 판단할 때 열영상장비용으로 사용하기에 충분한 성능을 보인 것으로 판단된다.

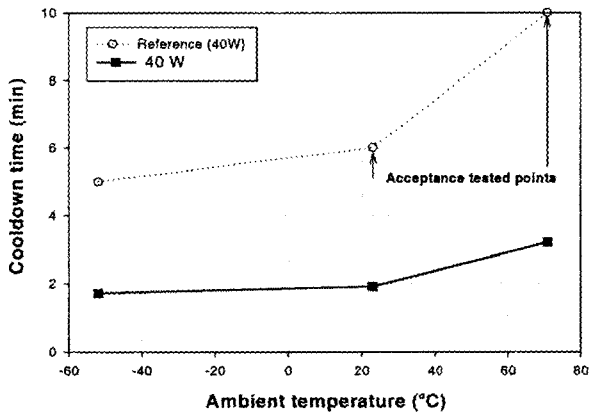


Fig. 6 Cool down time with ambient temperature

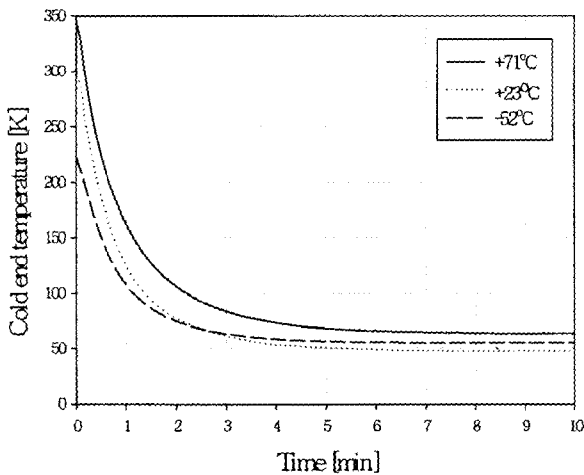


Fig. 7 Cool down characteristics with ambient temperature

4. 결 론

열영상장비용 스텔링 극저온 냉동기를 설계, 제작하여 MIL-STD-781C를 기반으로 한 기본, 성능, 환경 및 수명 시험의 일환으로 냉각능력/공급입력 및 냉각시간에 대한 성능시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 주위온도 +23℃에서의 최소냉각능력과 저온부 온도 80K에서의 최소냉각능력을

측정한 결과 열영상장비용으로 사용되는 스텔링 극저온 냉동기의 사양을 만족하였다.

- (2) 하지만 주위온도가 -52℃일 때에는 최소 허용 냉각능력보다 낮은 냉각능력을 보여주고 있는데, 이는 냉각기 결합체 부착시 열방출조건(10℃ 이하)을 초과하므로써 (약 18℃), 열손실이 증대되어 냉각능력 저하를 초래하고, 냉각기 결합체 부착시 팽창기와 dewar 사이의 O-ring(재질 : viton)의 열수축에 의해 미소한 누설이 발생하고, dewar의 진공도가 악화되어 기체 열전도 손실의 급증에 의한 열손실 증대로 냉각능력이 저하하는 것으로 판단된다.
- (3) 스텔링 냉동기의 저온부 온도가 80K 까지 도달하는 시간은 주위온도가 +72℃ 일 때는 약 3분이 소요되는데 반해 주위온도가 +23℃, -52℃ 일 때는 각각 약 2분과 1분 50초 정도 소요되었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] A.K. De Jonge, "A Small Free-Piston Stirling Refrigerator", American Chemical Society, pp.1136-1141, 1979
- [2] 박성제 외, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스텔링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 62-68, 2001.
- [3] 홍용주 외, "스텔링냉동기의 선형압축기 운전 특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001.
- [4] 김효봉 외, "작동주파수와 연결관 길이 변화가 스텔링 냉동기의 성능에 미치는 영향", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 55-61, 2001.
- [5] S.J.Park, et al., "An experimental study on the cooling performance and the phase shift between piston and displacer in the Stirling cryocooler", Journal of KIAS, Vol. 5, No. 1, pp. 111-117, 2003.