

적외선 센서 냉각용 스테링 냉동기의 수명/신뢰성 시험

박성제*, 홍용주*, 김효봉*, 유병건**, 이기백***

*한국기계연구원, **(주)우영, ***부산대학교

Reliability Test of the Stirling Cryocooler for cooling infrared detector

Seong-Je Park*, Yong-Ju Hong*, Hyo-Bong Kim*, Byung-Kun Yu**, Ki-Balk Lee***

*Korea Institute of Machinery & Materials, **WooYoung, ***Pusan National University

sjpark@kimm.re.kr

Abstract - A free piston and free displacer(FPFD) Stirling cryocooler for cooling infrared and cryo-sensors is currently under development at KIMM(Korea Institute of Machinery & Materials). 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 are investigated. This cooler delivers approximately 0.5W cooling at 77K for 30W ~ 40W of input power from AC power supply. And, after the climate performance and reliability for the cryocooler is discussed, operating test without cooling load at the cold end is performed.

1. 서 론

적외선 영상 시스템은 관찰되는 창의 2차원(또는 3차원)온도 분포를 파악하기 위하여 모든 물체에서 방사되는 열 적외선 복사를 이용한다. 적외선 영상은 열 정보를 나타내기 때문에 열 영상으로도 불리어진다. 또한 이 시스템들은 종종 전방 감시 적외선(FLIR, Forward Looking Infrared)이라고도 불린다. 그러나 열 적외선 영상은 별빛 또는 다른 낮은 주위 빛으로 인해 희미한 가시 파장들을 증폭하는 영상 강화기를 바탕으로 하는 야간 관찰 시스템(Night Vision System)과는 구별 된다. 그러한 영상 강화 시스템(Image Intensifier System)은 종종 근적외선(near-infrared) 영역까지 응답을 확장하지만 온도 정보를 공급하지는 않는다.

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 군사적

인 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.

냉각형 적외선 검지기는 최초의 단소자로부터 시작하여 현재는 초점면 배열 소자로 발전하였다. 초점면 배열 소자의 기술 개발은 미국과 유럽의 정부 연구소와 방산 업체에 의해 수행되었다. 일본과 이스라엘과 같은 나라들에서도 많은 진전이 있었지만 그 결과는 매우 통제되어 있다. 오스트레일리아와 같은 나라들은 초점면 배열(FPA)의 개발과 생산을 완전히 포기했다. 중국과 러시아는 냉각형 FPA에 관한 연구를 수행하고 있지만 생산 능력은 가지고 있지 않다.

적외선 영상 시스템은 적외선 검지기의 장 수명에 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 냉동기를 개발하여, 성능 실험을 통해 기존의 외국 제품과 동등한 수준에 도달하게 되어 수명과 신뢰성에 대한 연구가 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 적외선 센서 냉각용 스테링 극저온 냉동기의 수명을 향상 시키기 위해 필요로 하는 중요한 고려 사항과 지금까지 수행

되고 있는 기초 수명 시험에 대한 결과를 제시하고자 한다.

2. 스테링 극저온 냉동기

Fig. 1은 FPPD(Free Piston Free Displacer) 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.

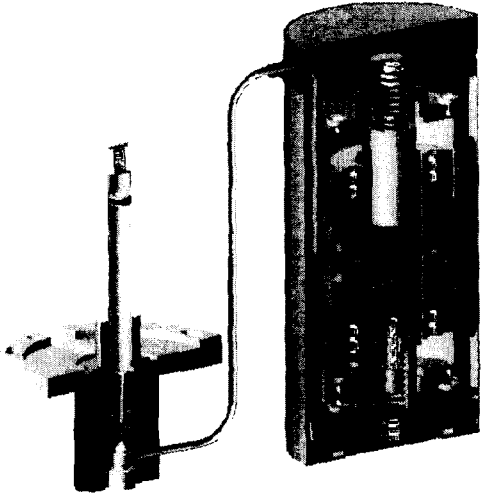


Fig. 1. 3-D design of the Stirling cryocooler

피스톤은 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 공간과 왕복기의 고온부 공간으로 구성된 압축공간으로부터 팽창공간 사이에 가스유동을 발생시킨다.

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

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

3. 수명/신뢰성 시험

3.1 성능시험(Acceptance test)

온도시험을 위해 냉동기와 주위온도 사이에 최대 10°C 이하의 온도차 강제 열교환 하고, 극저온 냉동기의 성능 시험을 위해 극저온 냉동기를 시험 듀어와 연결하고, 시험 듀어는 진공계와 연결(10⁻⁴mbar max)하여 성능시방서(TSP)에 제시된 열용량(thermal mass)과 시험 듀어의 열손실과 동일하게 한다. 제어기로부터의 입력전압은 10±0.2V를 유지한다. 냉각시 저온부의 온도가 77K에 도달할 때까지 최대전압으로 구동하고, 저온부의 온도가 77K로 유지될 때를 정상상태라 한다. 이상과 같이 극저온 냉동기를 작동하여 냉각시간과 냉동능력 등의 냉각 특성을 측정한다. 스테링 냉동기의 냉동능력 평가방법은 아래의 3가지 방법을 사용한다.

① 냉동기를 최대전압으로 작동하여 저온부가 77K로 유지되는 최대 열량을 공급할 때, 공급된 열량은 TSP에서 요구하는 값보다 높아야 한다.

② 냉동기를 최대전압으로 작동하여 시험에서 요구하는 열량을 저온부에 공급할 때 저온부의 온도는 77K보다 낮아야 한다.

③ 냉동기를 최대전압으로 작동하여 저온부가 77K로 유지하는 열량을 공급할 때의 입력전력이 TSP에서 요구하는 전기입력보다 낮아야 한다. 이 방법은 시험요구조건 중 냉동능력을 고려하지 않는 평가이다.

냉동기로부터 작동유체의 누설은 다음의 기준을 만족하여야 한다.

- ① 팽창부 누설량 : < 6×10⁻¹¹ Pa m³/s
- ② 압축기 누설량 : < 6×10⁻⁹ Pa m³/s

3.2 수명/신뢰성(Reliability) 시험

수명 시험은 연속적인 정규작동시험에 따라 극저온 냉동기의 신뢰성을 입증하는 것이다.

3.2.1 환경 내구성(Climatic Endurance)시험

스테링 극저온 냉동기를 진공펌프로 10⁻⁴mbar 이하의 진공으로 유지되는 시험 듀어에 연결하여 환경시험장치에 넣고 Fig. 2와 같은 온도 사이클에 따라 작동시킨다. 작동초기에 냉동기는 최대 전력으로 동작되고, 77K에 도달하면 그 온도가 유지되도록 한다. 극저온 냉동기가 77K가 유지되는 동안은 정상 작동하는 것으로 간주한다.

3.2.2 정규 작동시의 신뢰성 시험

극저온 냉동기는 진공펌프에 의해 10⁻⁴mbar 이하의 진공으로 유지되는 시험 듀어와 연결되어 환기가 가능한 시험장치에 놓여진다. 그리고 극저온 냉동기 저온부의 온도가 77K로 유지되면서 정상 작동하여야 하며, 이때 저온부의 온도를 측정하여야 한다. 극저온 냉동기는 적어도 1개월에 2번 이상 정지하여 저온부의 온도를 상온까지 올린 다음 다시 작동하여야 하며, 저온부가 77K로 유지되지 않으면 시험을 끝낸다.

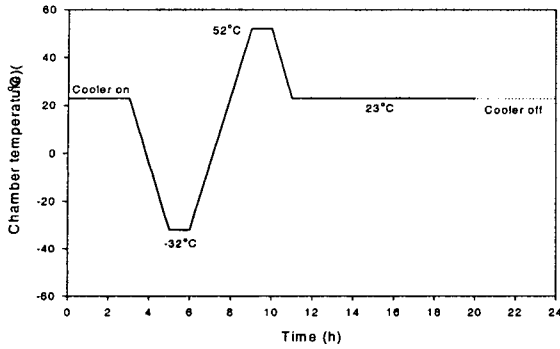


Fig. 2. Temperature profile

3.2.3 신뢰성에 영향을 주는 주요 인자

스터링 극저온 냉동기와 맥동관 극저온 냉동기에 선형압축기를 적용하므로써 피스톤에 가해지는 모든 힘은 피스톤의 움직이는 방향과 평행하고, 피스톤 링과 실(seal)은 10 μ m 정도의 간극으로 대체되어 가스 베어링과 플렉서 베어링이 접촉 슬라이딩(sliding) 베어링을 대신하게 되었다. 이런 베어링들은 마모 요소가 많이 제거되어 남은 중요한 고장 모드는 가스오염, 마모, 누설과 피로 등 4가지로 분류할 수 있다.

(1) 가스오염(Gaseous contamination)

가스오염은 냉동기 고장의 가장 중요한 원인이다. 특히 온도가 낮을수록 가스오염의 영향은 증가한다. 가스오염의 원인은 첫번째로, 냉동기 내부의 재료에 용해되어 있는 가스 성분이 시간이 지남에 따라 확산되기 때문이고, 두번째로, 작동 가스의 직접적인 오염 때문이다. 따라서 극저온 냉동기는 밀봉되기 전에 베이킹 아웃(bake out)과 충전 가스 오염의 점검을 하여야 한다.

(2) 마모(Wear)

마모는 발생하면 냉동기의 내부에서 마모 부스러기들에 의해 마모가 가속되기 때문에 특성을 규정하기가 어려운 고장 모드이다.

좁은 간극 실(seal)에서의 마모는 부스러기들을 발생시키고, 부스러기들은 좀더 많은 마모를 발생시키게 되며, 간극이 커지면 피스톤이 실린더 측면에 불규칙하게 충돌하게 되어 마모 속도를 증가시킬 수 있다. 또한 마모에 의한 부스러기들은 냉동기의 유로 저항을 증가시켜 입력 전력을 증가시키게 된다.

(3) 누설(Leakage)

헬륨 충전에 따른 누설은 극저온에서 피할 수 없는 문제로 남아있다. O-ring(O-링)과 에폭시와 같은 비금속 재질에서는 헬륨이 많이 누설된다. 대안으로서 연성이 높은 금속재질은 비금속 재질보다 누설에 우수한 성질을 가지지만, 모든 조건, 특히 온도가 변하는 조건에서도 장착시의 하중을 유지하도록 설계하여야 한다.

(4) 피로(Fatigue)

코일 스프링, 플렉서 스프링, 피스톤과 같이 움직이는 전원 공급선과 굽힘 응력을 받는 얇은 튜브 등은 유한요소법을 사용하여 최악의 작동 조건에서의 응력 해석을 수행하므로써 재료의 피로 강도에 대한

자료를 확보하여야 한다. 피로에 의한 고장은 다른 고장 모드에 비하여 2차적이고, 발생할 기회는 적다.

4. 성능시험 및 정규 작동 신뢰성 시험

Fig. 3은 성능 및 수명 시험을 위한 환경시험 장치의 개략도를 보여주고 있으며, Fig. 4는 스테링 극저온 냉동기가 설치되어 있는 환경시험 장치의 내부를 보여주고 있다. 환경시험 장치는 스테링 극저온 냉동기의 저온부 뿐만 아니라 압축기 표면, 팽창기 고온부 및 실내 온도를 측정할 수 있고, 또한 진공 듀어의 진공도, 스테링 극저온 냉동기의 공급 전력 등을 측정하여 데이터 수집 장치를 통해 측정 데이터를 정리하였다.

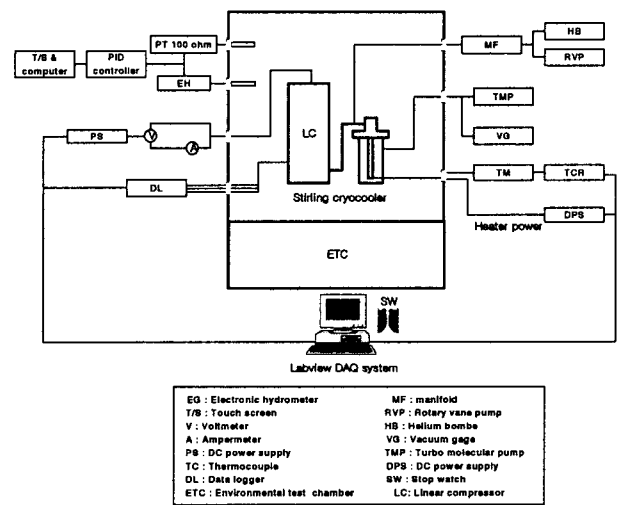


Fig. 3. Schematic diagram of the reliability/environmental test apparatus

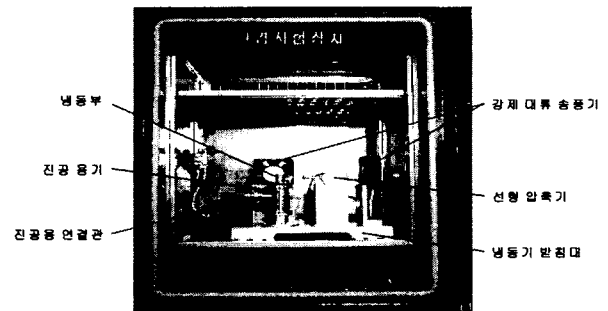


Fig. 4. Environmental test apparatus

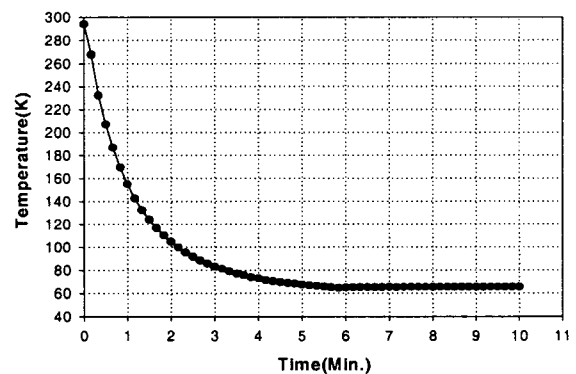


Fig. 5. Cool down characteristics

Fig. 5는 수명/신뢰성 시험에 앞서 측정한 스테링 극저온 냉동기의 냉각특성을 보여주고 있다. 최저도달온도는 65.4K이고, 77K까지의 도달 시간은 3분 30초이다.

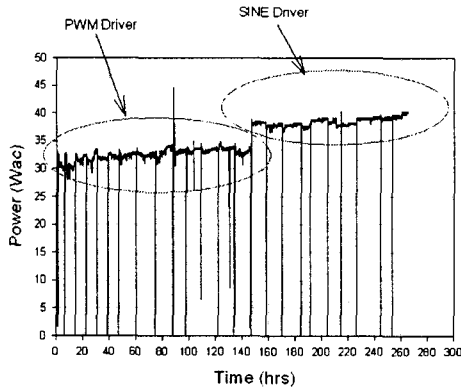


Fig. 6. Input power

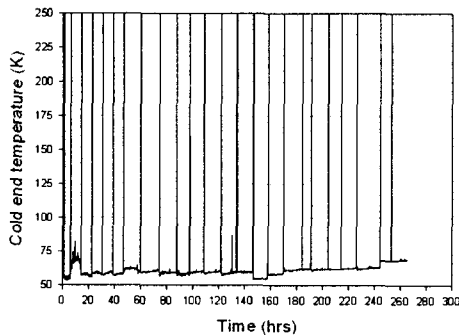


Fig. 7. Cold end temperature

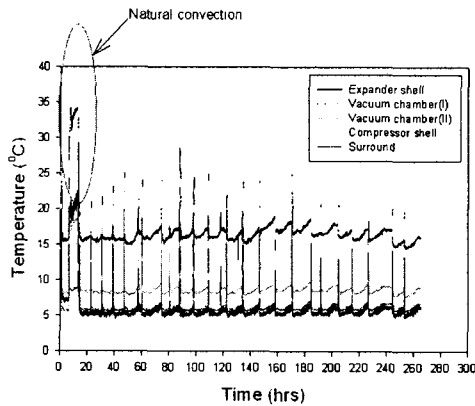


Fig. 8. Environment temperature

Fig. 6은 부하가 없는 상태에서 스테링 극저온 냉동기를 작동하기 위하여 공급된 입력 전력의 변화를 보여주고 있다. 공급 전압의 제한치는 10.0V로 하였고, 공급전류의 제한치는 4.0A로 하였기 때문에 최초의 공급 전력은 약 30W 이었으며 작동 시간에 따라 점점 증가하는 경향을 보였으나, 큰 변화는 없었다. 약 150시간 이후의 공급 전력의 갑작스런 상승은 스테링 극저온 냉동기의 PWM(Pulse Width Modulation) 전력 공급기의 고장으로 정현파를 발생하는 교류 전원 공급기를 사용하므로써 달라진 현상이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 6과 같은 전력을 부가하였을 때 약 270시간동안 작동할 때까지의 저온부의

온도와 스테링 극저온 냉동기의 다른 부위에서의 온도를 보여주고 있다. 초반의 약 10시간의 자연 대류 냉각 조건에서의 측정 결과를 제외하고, 이후의 실험은 스테링 극저온 냉동기를 환경시험장치에 넣은 뒤 환경시험장치 실내온도를 약 5°C로 유지한 상태에서 이루어 졌다. 또한 수명 시험은 매일 약 10~12시간 작동한 뒤, 멈추고 다시 작동하였다. 스테링 극저온 냉동기의 저온부에서 최초의 최저도달온도는 약 55K이었으며, 270시간까지 연속 운전되면서 약 65K까지 상승하였다. 이러한 결과는 압축기의 성능이 아주 천천히 저하되면서 압축기 표면의 온도가 최초의 약 18°C에서 약 23°C까지 증가하기 때문이다. 하지만 270시간의 작동 시간이 지난 상태에서도 공급 전력 40W에서 최저도달온도가 약 65K로서 수명시험은 계속 되어야 한다.

5. 결 론

이상과 같이 선형압축기형 스테링 극저온 냉동기 시제품을 설계, 제작하여 기본 성능 시험을 수행하고, 수명/신뢰성을 수행하였으며, 스테링 극저온 냉동기의 수명에 영향을 주는 여러 가지 요인들을 고찰해 보았다.

수명/신뢰성 시험에 앞서 측정한 스테링 극저온 냉동기의 냉각특성을 보여주고 있다. 최저도달온도는 64.5K이고, 77K까지의 도달 시간은 3분 30초이었다.

또한 약 270시간 까지의 수명 시험동안 최초의 공급 전력은 약 30W 이었으며 작동 시간에 따라 점점 증가하는 경향을 보였으나, 큰 변화는 없었다. 그러나 스테링 극저온 냉동기의 저온부에서 최초의 최저도달온도는 약 55K이었으며, 270시간까지 연속 운전되면서 약 65K까지 상승하였다. 이러한 결과는 압축기의 성능이 아주 천천히 저하되면서 압축기 표면의 온도가 최초의 약 18°C에서 약 23°C까지 증가하기 때문이다. 하지만 270시간의 작동 시간이 지난 상태에서도 공급 전력 40W에서 최저도달온도가 65K로서 정상작동하고 있어 수명시험은 계속 될 것이다.

후 기

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

(참 고 문 헌)

- [1] 박성제 외, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스테링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 62-68, 2001
- [2] 홍용주, 박성제, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "스테링냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001