

# 열상장비용 스테링 극저온 냉동기 특성평가 (II) : 수명시험

홍용주, 박성제, 김효봉, 김양훈\*, 권영주\*\*  
한국기계연구원, \*부산대학교 대학원, \*\*(주)우영

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

Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Yang-Hoon Kim\*, Young-Ju Kwon\*\*  
Korea Institute of Machinery & Materials, \*Pusan National Univ.,  
\*\*Wooyoung Co., LTD

yjhong@kimm.re.kr

**Abstract** - The needs for the cryocooler which has high reliability and long MTTF are increased in the military and commercial thermal imaging system. The gas contamination, wear, leakage of the working fluid, fatigue and etc. have the significant effects on the reliability and MTTF(Mean Time To Failure) or MTBF(Mean Time Between Failure) of the Stirling cryocooler. In the KIMM, the Stirling cryocooler with the linear compressor was released after the several performance tests were performed. This paper describe the experimental facility for the MTTF evaluation and some typical results of the Stirling cryocooler.

### 1. 서 론

극저온 냉동기(cryocooler)는 센서의 민감도의 향상 뿐 만 아니라 주위로부터의 잡음을 제거하기 위해 사용되어진다. 극저온 냉동기의 주요한 선정요소는 가격, 신뢰성, 사용 환경, 설치편리성, 운전비용, 냉각특성을 들 수 있다. 1980년대 중반 로타리(rotary)형 스테링 극저온냉동기의 평균수명은 1,000 ~ 2,500시간에 불과하였으나, 1990년대 선형압축기의 등장으로 평균수명은 4,000시간에 이를 정도로 큰 증가가 가능하였다.[1]

스테링 극저온 냉동기의 수명을 제한하는 주요한 인자는 작동유체 오염 및 누설, 마모, 피로 등이 있으며, 무급유 선형압축기(linear compressor)의 도입, 미끄럼(sliding) 베어링을 Flexure 베어링, 피스톤링, seal을 간극으로의 대체, 초고순도 가스의 주입은 극저온 냉동기의 평균수명의 증가의 주요한 요인이다.

작동유체의 오염(contamination)은 극저온 냉동기의 성능을 저하시키는 주요한 요인으로, 오염은 냉각부의 온도가 낮을 수록 더 큰 영향을 미친다. 작동유체의 오염은 주로 초기 작동유

체 주입시 불순물의 유입과 극저온 냉동기 내부에서의 outgassing으로 인해 유발되며, 조립시 충분한 baking의 수행, outgassing을 고려한 냉동기 재질의 선정, 고순도의 작동유체 주입을 통해 개선될 수 있다. 작동유체의 오염으로 인한 냉동기 성능은 주로 작동유체 중 불순물(주로 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) 농도의 증가에 의해 발생하며, 냉동기의 최저도달온도의 상승 즉 성능저하를 유발한다.[2]

마모(wear)는 극저온 냉동기의 수명을 제한하는 인자 중 규명하기 가장 어려운 요인으로, PTFE(polytetrafluoroethylene) 계열 재료 간극 seal의 마모는 운전 중인 냉동기 내부에 미세한 부스러기를 발생시켜, 재생기 및 유로를 봉쇄하는 요인이 되기도 하고, 간극에서 발생한 부스러기는 마모율을 증가시키는 원인이 된다. 간극 seal의 마모로 인한 간극의 증가는 극저온 냉동기의 성능저하를 유발하는 큰 원인이 되며, 간극의 증가는 급격한 입력전력의 증가 또는 냉동능력의 급격한 저하를 유발한다. 따라서 극저온 냉동기가 운전 중 적절한 간극을 유지할 수 있도록 설계되어야 한다.[3]

O링, 에폭시 등의 비금속 재질을 통한 충전된 작동유체의 누설(leak)은 극저온 냉동기의 큰 문제점 중의 하나이다. 금속재질의 O링은 비금속 재질의 경우보다 누설량은 작으나, 온도에 따른 변형을 고려하여 장착조건을 설정하여야 한다. 또한 전류도입선은 역시 누설의 원인을 제공하기도 한다.

피로(fatigue)에 가장 취약한 극저온 냉동기 요소는 코일 또는 Flexure 베어링, 전력인입선, 얇은 관으로, 설계 단계에서 충분한 피로에 대한 고려가 수행되어야 한다.

스테링 극저온냉동기의 수명에는 이들 인자가 복합적으로 연계되어 작용하기 때문에, 수명을 개선하고 신뢰성 높은 극저온 냉동기의 개발을 위해 많은 연구개발이 수행되어지고 있으며, 본 논문에서는 열상장비용 스테링 극저온냉동기의 특성평가의 일환으로 수행된 수명시험을 고찰하고자 한다.

## 2. 본 론

신뢰도(reliability)란 “시스템, 기기 및 부품 등이 정해진 사용조건에서 의도하는 기간 정해진 기능을 발휘할 확률(probability)”로 정의된다.[4] 신뢰성 시험은 고정시간분포에 대한 데이터를 얻고, 이에 의거 제품의 신뢰성 모수 특히 평균수명과 평균고장률을 추정하는 것이다. 고장률(failure rate, FR)은 단위시간당 발생한 고장의 수를 의미하며, 전형적인 수명 곡선은 욕조 곡선(bath hub curve)이라 불리는 Fig. 1과 같다.

초기 고장은 냉동기의 제작과정에서 발생하는 결함으로 인해 유발되며, 출하 이전에 수명시험을 통해 제거 될 수 있다. 출하 이후 대다수의 극저온 냉동기는 문제없이 동작하는데, 소수의 극저온 냉동기는 우발적인 사건(예로 전기충격)으로 인해 고장이 발생한다. 이와 같은 우발적인 고장은 운전시간 전반에 걸쳐 발생할 수 있으며, 이 기간 중 고장률은 일정하다. 운전시간이 경과됨에 따라 극저온 냉동기는 마모로 인해 seal의 손상 또는 작동유체의 누설 등의 문제가 발생하는데, 이는 우발적인 고장과는 달리 모든 극저온 냉동기에서 발생한다. 마모로 인한 손상 발생은 냉동기에 따라 그 시점은 다르나, 모든 극저온 냉동기에 적용된다. 수명은 마모로 인한 고장이 우발적인 고장보다 더 커질 때까지의 시간이며, 이 이후에는 고장률이 급격히 증가한다.

고장률과 신뢰성 해석에서 신뢰도함수( $R(t)$ )는 시간  $t$ 에서 냉동기가 설계 냉동능력을 발휘할 수 있는 가능성을 의미하며, 수명시험에서 이는 시간  $t$ 에서 정상적으로 운전되고 있는 냉동기의 대수를 시험에 투입된 초기 냉동기의 대수로 나누는 값을 의미한다. 우발고장 기간동안 고장률( $\lambda$ )은 일정하기 때문에 신뢰도함수는 지수적으로 감소한다.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

일반적으로 MTTF는  $dt$  시간 동안  $t$ 시간에서의 고장 냉동기 수로부터 구할 수 있으며, 다음과 같이 정의된다.

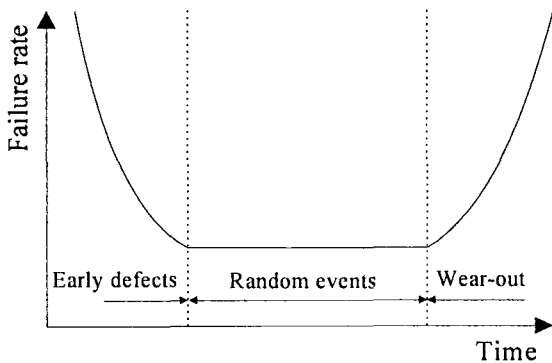


Fig. 1. Typical failure rate curve

$$MTTF = \int_0^{\infty} t\lambda(t)R(t)dt$$

여기서  $t=0$ 은 제작사에서 냉동기가 초기 고장 기간 동안의 burn-in 기간을 거친 후, 냉동기의 사용자가 작동을 개시하는 시간을 의미한다. 일반적으로 극저온냉동기는 일단 작동이 개시되면 운전초기에 기능을 상실할 가능성은 매우 작으며, 작동 개시후 300~500시간 운전되면 장시간 운전의 가능성이 매우 크다. 따라서 작동초기의 고장률은 일정하며, MTTF는  $1/\lambda$ 와 같다. 또한 작동중인 극저온 냉동기의 MTTF는 (누적 작동시간)/(고장 냉동기 대수)와 같다.

### 2.1 MTTF 시험 방법 및 장치

MTTF 시험 방법으로는 일반적인 사용조건보다 가혹한 환경조건에서 동작을 수행하여 고장 시간을 단축시키는 가속시험(HALT, Highly Accelerated Life Test)이 주로 사용된다. 선형압축기형 스티어링 극저온 냉동기는 공진조건에서 운전되는 선형압축기 특성상 가속시험을 수행하기 위해서는 선형압축기 및 팽창부 설계 변경이 요구됨으로 인해, 일반적인 가속시험이 곤란한 것으로 알려져 있다.[5]

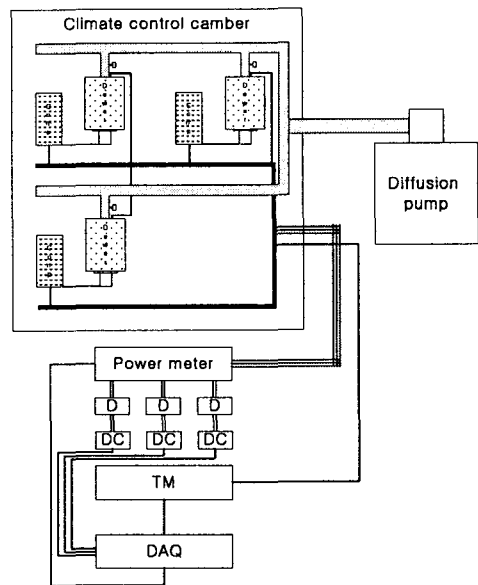


Fig. 2. Schematic diagram of MTTF test facility

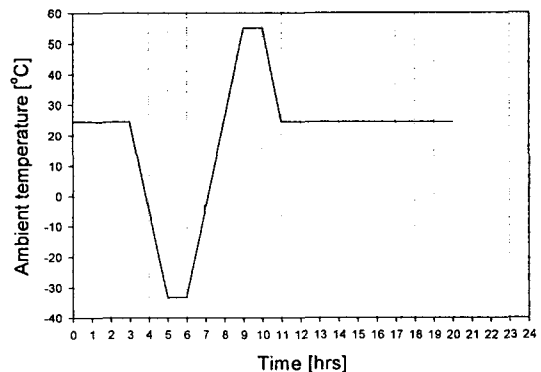


Fig. 3. Ambient temperature profile

신뢰성 시험 방법으로는 일정시간이 경과하거나 또는 일정수의 고장이 발생하면, 시험을 중단하는 중도중단시험이 많이 사용되어지며, 본 시험은 MIL-STD-781C를 기반의 계수축차 샘플링 검사방법 혹은 확률비 축차시험(PRST, probability ratio sequential test)을 채택하였다. MIL-STD-781C는 지수적인 신뢰도함수를 바탕으로, 설정된 생산자 위험(producer's risk) 및 소비자 위험(consumer's risk), 판별비(discrimination ratio)를 근거로 시험시간이 결정된다.

Fig. 2는 스테링 극저온 냉동기의 MTTF 시험을 위해 구성된 시험장비의 개략도이다. 스테링 냉동기의 구동 제어기(D)는 직류전원(DC)를 통해 공급되는 직류전압에 의해 제어되며, 이때의 냉동기의 입력전압, 전류 및 전력은 전원측정기(Powermeter)를 통해 측정, 기록된다.

스테링 극저온 냉동기의 저온부는 모사 Dewar 내에 장착되며, 주위로 부터의 열침입을 최소화하기 위해 확산진공펌프를 이용하여  $10^{-4}$  Torr 이하의 진공도를 유지하도록 하였다. 또한 스테링 냉동기의 운전상태를 모니터링하기 위해 저온부에 온도센서를 설치하였으며, 이로부터 얻어진 온도를 기반으로 시험중 저온부의 온도가 80K로 유지될 수 있도록, 구동제어기 PID 제어를 수행하였다.

한편 스테링 냉동기는 주위 온도의 제어가 가능한 환경챔버내에 설치하여, 스테링냉동기의 설치 및 운전조건(계절요인)을 모사하기 위해 Fig. 3에 나타낸 바와 같은 주위온도 변화(+23°C → -32°C → +52°C → +23°C)를 부가하였다. 이때 모사 Dewar에 설치된 스테링 냉동기의 충분한 방열을 위해 선형압축기 및 팽창기의 고온부를 외부 케이싱과의 열접촉이 원활하도록 하였다.

시험은 24시간을 한 주기로, 20시간 동안의 냉동기 운전과 4시간의 운전 정지로 구성하였으며, 운전 초기에는 급격한 입력전력의 인가로 인한 충격으로부터 스테링냉동기의 구동부를 보호하기 위하여, 점진적으로 인가전력을 증가시켰으며, 설정온도에 도달한 이후에는 저온부의 온도를 일정(80K)하게 유지하도록 하였다. 또한 냉동기의 성능변화를 관찰하기 위해 매 24시간 마다 냉각성능 및 냉동능력을 측정하였다.

## 2.2 MTTF 시험 결과

Fig. 4, 5, 6, 7은 시험 중 스테링 냉동기 저온부의 온도, 입력전력, 냉동능력, 저온부 온도 80K 도달 시간을 모니터링한 결과이다. 이때 냉동능력 시험은 40W의 선형압축기 입력전력을 인가하여 수행하였다.

매 24시간의 운전주기 중 저온부의 온도는 운전 초기의 상온으로부터 급속한 강온이 이루어지며, 시험 중 80K 부근의 온도에서 적절한 입력전력을 통해 냉동기의 제어가 수행되어짐을 알 수 있다.

이를 통해 시험 스테링 냉동기가 초기 고장시간을 통과하여, 우발고장기간으로 진입하였음을 알 수 있다.

스테링 냉동기 압축기로의 입력전력은 운전 초기에는 최대 입력전력으로 운전함으로 인해 약 40W 부근으로 나타나나, 정상운전 중에는 약 15W 미만으로 유지됨을 알 수 있다. 한편 정상 운전시에도 주위온도의 변화에 따라 입력전력의 변화가 발생하는데, 이는 주위온도가 상승하는 경우에는 주위로 부터의 전도 및 복사열전달을 통한 열침입의 증가로 인한 냉동기 부하의 증가, 냉동기의 평균온도 상승으로 인한 선형압축기 운전조건 변화로 인해 발생하고, 주위 온도가 낮은 경우에는 주위로 부터의 열침입은 감소하나, 이 역시 선형압축기의 운전조건 변화를 초래하기 때문이다. 특히 본 시험의 경우에는 모사 Dewar를 통해 발생하는 주위로부터 저온부로의 열침입(가스 전도열손실)을 억제하였으나, 주위 온도가 낮은 경우에는 진공배관에서 발생하는 누설로 인해 열침입의 급격한 증가가 발생하는 것으로 나타났으며, 이로 인한 스테링 냉동기의 입력전력 증가가 발생하는 것으로 판단된다.

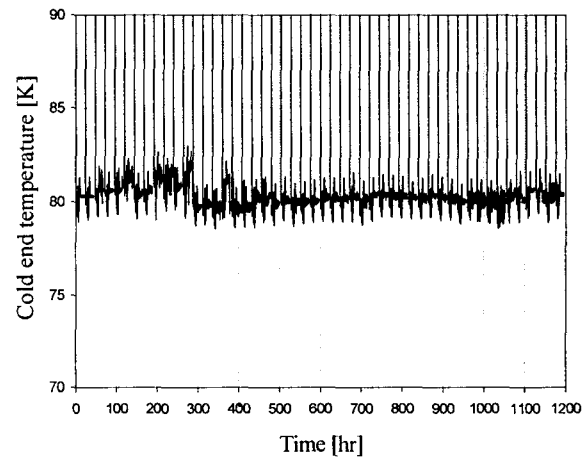


Fig. 4. Cold end temperature of the Stirling cryocooler during the MTTF test

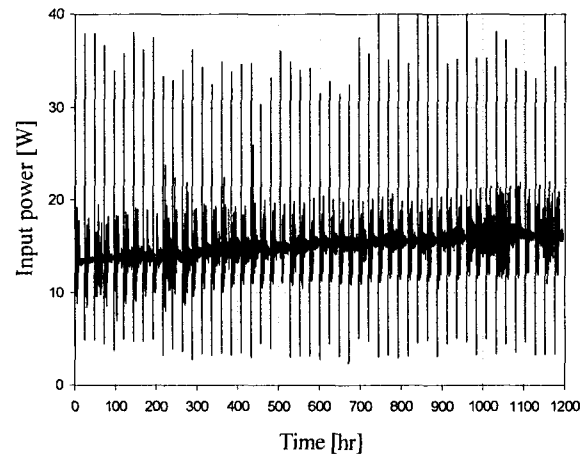


Fig. 5. Input power to the Stirling cryocooler during the MTTF test

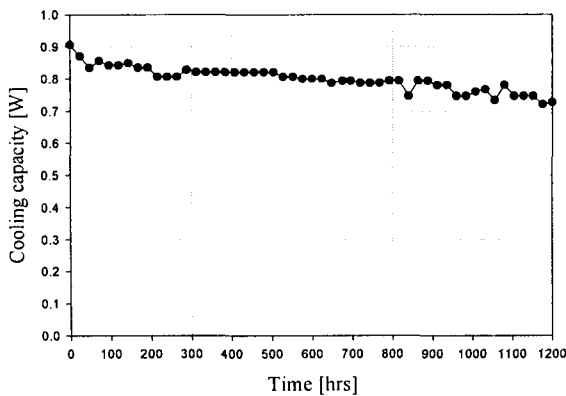


Fig. 6. The cooling capacity of the Stirling cryocooler

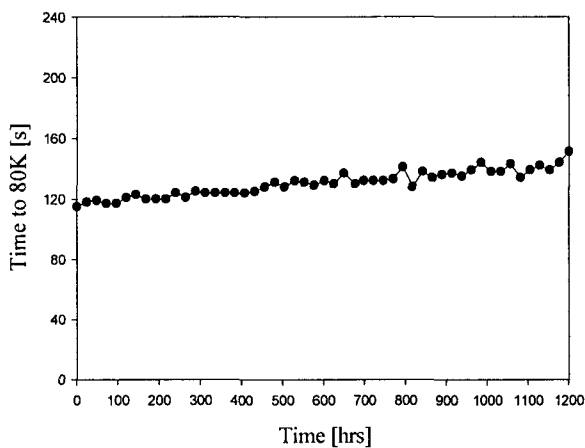


Fig. 7. The required time to 80K at the cold end of the Stirling cryocooler

따라서 스텔링 극저온냉동기에서 압축기로의 입력전력의 증가는 선형압축기의 변위의 증가를 수반하고, 이로 인해 시험에서는 정상동작의 경우보다 더 가혹한 운전조건이 발생하였음을 예측할 수 있다.

Fig. 6 및 7에서 알 수 있는 시험 초기에 발생하는 냉동능력(주위온도가 +23℃일때, 입력전력 40W 인가시) 및 냉각소요시간(주위온도 +23℃, 일정전압 인가시)의 변화 즉 성능변화는 스텔링 극저온냉동기의 선형압축기와 변위기에 설치된 seal의 마모 및 aging으로 인한 것으로 판단된다. 한편 스텔링 극저온냉동기는 충전압력 즉 운전 중 평균압력에 따라 선형압축기의 공진특성이 크게 변화하고, 이로 인해 입력전력의 특성이 크게 변화하기 때문에 Fig. 6의 입력전력의 변화로부터 스텔링 극저온냉동기에서 발생하는 작동유체의 누설은 미미함을 알 수 있다. 이때 냉각소요시간의 경우 냉각대상의 열관성(thermal inertia)에 의해 결정되기 때문에 스텔링 극저온냉동기의 객관적인 성능을 파악할 수 있는 지배적인 인자는 아니나, 상대적인 냉동기의 성능변화가 가능하다.

이와 같은 Fig. 4, 5, 6, 7에 나타난 스텔링 극저온냉동기의 운전 특성으로부터, 시험 스텔링

극저온냉동기의 평균수명이 수 천시간에 도달함을 알 수 있으며, 운전초기에는 다소간의 성능저하가 발생하나, 우발고장기간에 도달한 이후에는 큰 성능의 변화없이 운전됨을 알 수 있다. 또한 스텔링 극저온냉동기의 주위온도 조건은 냉동기의 성능에 큰 영향을 미치고, 이로부터 압축기 및 팽창기로부터 주위로의 열전달 특성이 주요한 냉동기 성능 변화의 원인이 됨을 알 수 있다.

### 3. 결 론

열상장비용 스텔링 극저온냉동기의 성능평가의 일환으로 MIL-STD-781C를 기반으로 한 스텔링 극저온냉동기의 신뢰성 시험 즉 수명평가 시험설비를 구축, 수명시험을 수행하였으며, 이를 통해 선형압축기 구동 스텔링 극저온냉동기의 평균수명이 수천시간에 이르는 성과를 파악하였다. 또한 스텔링 극저온냉동기 운전 초기에는 다소의 성능저하가 발생하나, 우발고장기간에 도달한 이후에는 성능의 변화가 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다.

본 연구는 1999년도 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 본 연구의 수행에 큰 도움을 주신 국방과학연구소 김남환박사님, (주)우영 이성래 대리님께 깊은 감사를 드립니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] W. E. Salaza, Status Report on the Linear Drive Coolers for the Department of Defense Standard Advanced Dewar Assembly (SADA), Cryocoolers 12, pp. 17-25, 2003
- [2] S. W. K. Yuan, D. T. Kuo, and A. S. Loc, Cryocooler contamination study, Adv. Cryogenic Eng., Vol 45, pp. 275-282, 2000
- [3] S. W. K. Yuan, D. T. Kuo, and A. S. Loc, Enhanced performance of the EEI 0.5 Watt mini-linear Stirling cooler, Adv. Cryogenic Eng., Vol 43, pp. 1847-1853, 1998
- [4] 이상용, 신뢰성공학, 형설출판사, 1992
- [5] V. V. Eremenko, V. F. Getmanets, A. Ya. Levin, Yu. A. Pokhil, V. A. Popov, H. Stears, T. Davis, New methodology and apparatus for accelerated long-life testing of linear-drive cryocoolers, Cryogenics 39, pp. 1003-1005, 1999