

초점면배열 적외선검출기 냉각용 일체형 스테어링 극저온냉동기 기술동향

홍용주, 박성제, 김효봉 | 한국기계연구원

1. 서론

적외선 검출기(infrared detector)는 InSb, HgCdTe 등의 반도체 소자로, 근적외선에서 원적외선 영역에 이르는 광범위한 파장 범위의 적외선을 검출하여 이를 영상화하는 기기로, 열영상(thermal imaging) 또는 FLIRs(Forward Looking Infrared)로도 불리며, 최근에는 항공기/전차/장갑차/열추적미사일 등 군사분야, 열영상진단기, molecular spectroscopy, 레이저 진단 등의 산업 및 의료 분야에서 그 활용도가 크게 증가되고 있다.

적외선 검출기는 실온 이상의 검출대상물이 방사하는 주로 3~5 μm 파장영역(MWIR, Mid Wave Infrared) 및 8~14 μm 파장 영역(LWIR, Long Wave Infrared)의 방사에너지를 검출함으로써, 영상증폭에 기반을 둔 야시장비(Night Vision System)와는 달리 검출대상의 온도분포를 검지할 수 있다.

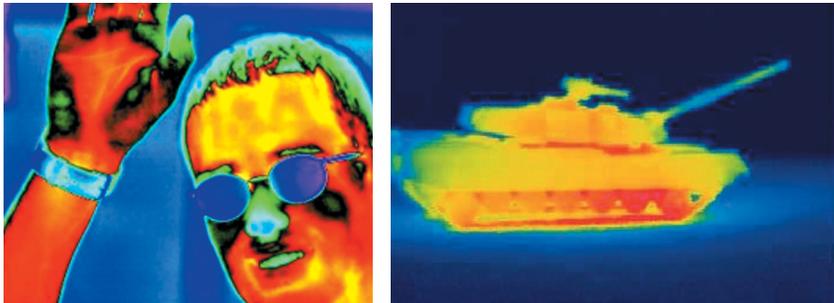


그림 1. 적외선 검출기 활용 예

본 고에서는 적외선 검출기 및 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 작동원리, 기술적 특징, 개발현황을 살펴보고자 한다.

2. 초점면배열 적외선 검출기

적외선 검출기는 기술의 개발에 따라 1세대 단소자로부터, 4세대의 초점면배열(FPA, Focal Plane Array)로 분류된다. 1960년대 개발된 1세대 적외선 검출기는 기계적인 스캐너 시스템으로서 검출기 내부의 수평,

수직 거울을 전기 모터로 구동하여, 이를 영상으로 재현해 내는 방식으로써, 검출소자를 액체질소 온도수준(77K, -196℃)으로 냉각하는 것이 필요하고, 이를 위해 주로 한제(cryogen, 주로 액체질소)가 사용되었으며, 빈번한 한제의 재충전이 요구되었다.

1980년대의 2세대 적외선 검출기는 열전냉동기(thermo-electrical cooler)를 사용함으로써 장비의 소형화와 더불어 온도분포를 데이터화하여 열영상 및 온도를 동시에 구현하였다. 그러나 열전냉동기를 통한 냉각온도 수준(-75℃)이 액체질소온도보다 높아 1세대 시스템에 비하여 선명한 영상을 구현해 내지 못하는 단점이 있었다.

1990년대의 3세대 적외선 검출기는 직접 디지털방식으로 신호처리가 가능한 디지털 영상 처리 시스템으로, 검출기 측면에서는 종전의 적외선 검출기 시스템이 적외선 검출기로부터의 아날로그 신호를 변환기에서 디지털로 변환하거나, 아날로그 신호 그대로 처리하는 방식이었기 때문에 정확한 영상을 구현하지 못하는 한계를 극복하였고, 선형 압축기(linear compressor) 구동 스테링 극저온냉동기(Stirling cryocooler)를 채택하여 경량화를 통한 장비의 기동성 및 휴대성을 향상하였다.

그러나 3세대 적외선 검출기 역시 거울을 구동하여 영상을 얻어야 하는 단소자 혹은 선형배열 소자 방식으로, 스테링 극저온냉동기의 제한적인 수명 및 거울 구동 모터 및 거울의 신뢰성, 내구성으로 인해 빈번한 유지 보수가 필요하였다.

해상도, 감도(NETD, Noise Equivalent Temperature Difference), 가시픽셀수, 검출 파장영역, 온도검출영역, 가시각도, 응답성, 냉각방식, 온도정확도, 영상분석방법, 중량, 소요전력 등은 적외선 검출기의 주요한 요구조건으로, 그 중에서도 감도는 적외선 검출기의 신호/잡음비 또는 열감지 성능을 판별하는 주요인자이다.

표 1. 적외선 검출기소자의 동작특성 (PV : Photovoltaic, PC : Photoconductive)^[1]

Material	Operating mode	Operating temperature (K)	Time const.(μsec)	Wavelength(μm)	Specific detectivity (cm-Hz ^{1/2} /W)
InSb	PV	77	0.1 - 2	3 - 5	5 × 10 ¹⁰
HgCdTe	PV	195	2	3 - 5	4 × 10 ¹⁰
HgCdTe	PC	77	0.5 - 2	8 - 12	2 × 10 ¹⁰
PtSi	Schottky	77	100	3 - 5	2 × 10 ⁹
Pyroelectric	-	300	100 - 10,000	1 - 35	8 × 10 ⁸
Microbol.	-	300	10,000	8 - 12	1.1 × 10 ⁹

액체질소 온도 수준에서 동작하는 InSb, HgCdTe, PtSi 등 광자(photon) 검출방식의 적외선 검출 소자는 실온에서 동작하는 열감지방식(Pyroelectric, Microbolometer)에 비해 탁월한 시정수 및 신호/잡음비를 구현할 수 있고, 집적회로 개발 기술의 발전에 힘입어 픽셀수면에서 640 x 480 및 그 이상의 대형/고해상도를 구현할 수 있게 됨에 따라, 거울 및 구동 모터가 필요 없는 4세대 초점면 배열 적외선 검출기가 개발되어, 이전의 1~3세대의 적외선 검출기에 비해 획기적으로 선명한 영상의 구현, 휴대 용이성 및 정확한 온도분포의 구현이 가능하여, 군사, 산업, 의료 분야의 다양한 요구를 만족시킬 수 있게 되었다.

한편 위성탑재센서, 항공기, 전투차량 등의 전방 감시 적외선 장비, 사격통제 장치, 정밀온도진단 등에 사용되는 초점면 배열 방식의 적외선 검출기의 검출기 신호/잡음비의 개선을 위해 액체질소온도 수준의 냉각형 열 영상 장비가 필수적이며, 고집적화에 따른 적외선 검출기의 열부하 증가에 대해 효과적으로 대응하기 위한 극저온냉동기 특히 저진동/소형/경량의 극저온냉동기가 요구된다.

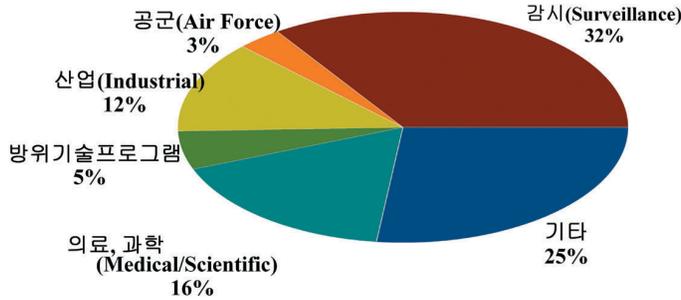


그림 2. 초점면 배열 적외선 검출기의 응용분야

초점면배열 적외선 검출기를 극저온의 온도로 냉각할 수 있는 냉동기로는 표 2에 나타난 바와 같이 열전 (Peltier) 냉동기, 줄-톰슨(Joule-Thomson) 극저온냉동기, 맥동관(Pulse Tube) 극저온냉동기, 회전 또는 선형 방식의 스테링 극저온냉동기 등이 있으며, 각각 다른 적외선 검출소자의 냉각요구온도에 대한 대응성, 이동성을 고려한 시스템 중량 및 소요전력, 수명(MTTF, Mean Time To Failure), 특히 냉각기/듀어 (Dewar) 통합(IDCA, Integrated Detector Cooler Assembly) 특성을 요구하는 초점면배열 방식의 적외선 검출기는 분리형 스테링 극저온냉동기(split type Stirling cryocooler)에 비해 열효율이 높고 경량화가 용이한 회전 일체형 스테링 극저온냉동기(rotary integral Stirling cryocooler)가 채용되고 있다.

표 2. 극저온냉동기의 장단점

Cryocooler	Advantage	Limitation	Application
Rotary Stirling	-Autonomy -Compacity -Power consumption	-MTTF(to 5500 hrs) -Induced Noise -Cooling time(4 ~ 10 min)	-Missile with observation (autonomy, compacity) -Light camera, UAV
Linear Stirling	-Autonomy	-MTTF(to 5,500 hrs for std., 20,000 hrs for flexure) -Induced noise & vibration -Efficiency -Cooling time(4~ 10 min)	-Camera for land/air/sea application & long time surveillance (autonomy, cooling capacity)
Stirling type Pulse Tube	-MTTF : 20,000 hrs -No induced vibration	-Autonomy -Efficiency -Cooling time(4 ~ 10 min)	-Spatial observation -application with autonomy without vibration
Joule Thomson	-Price -Compacity -No noise,Reliability -Cooling time(in sec)	-Autonomy -Logistic (space bottle)	-missile (cooling time, compacity of the tube)
Peltier	-Price -Compacity -Reliability -No noise	-Cooling capacity -Efficiency (power consumption and battery mass)	-low cost & short range detection application

3. 회전 일체형 스테링 극저온냉동기의 개요

스테링 극저온냉동기는 충전된 고압의 헬륨을 압축/팽창시키는 압축기와 저온을 발생시키는 재생열교환기(regenerator) 및 팽창피스톤(또는 변위기)으로 구성되며, 팽창공간에서의 연속적인 헬륨의 팽창을 통해 80 K 이하의 낮은 최저도달온도(no load temperature)를 구현할 수 있고, 카르노(Carnot) 효율을 달성할 수 있는 등온압축, 등적이동, 등온팽창, 등적이동으로 구성된 역 스테링사이클(그림 3)을 이용하는 기계식 냉동기로, 높은 이론 성능계수(Coefficient of Performance, COP)를 나타낼 수 있는 극저온냉동기이다.^[2]

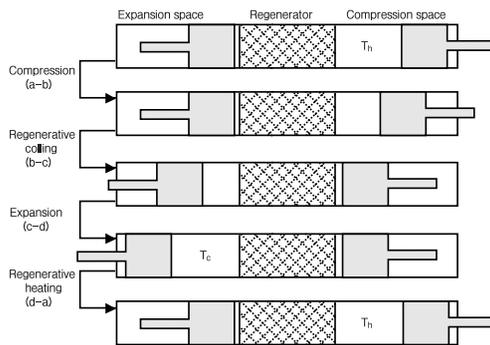


그림 3. 스테링 극저온냉동기의 동작원리

스테링 극저온냉동기는 1860년대 스코틀랜드의 A. Kirk에 의해 개발되어진 이래, 주로 적외선 탐상장비에 장착되어 적외선소자를 80 K 이하의 온도로 냉각시키는 냉각기 및 크라이오펌프(cryopump)용으로 실용화되어져 양산되고 있으며, 특히 극저온냉동기 분야에서 스테링 극저온냉동기는 소형, 경량, 고효율의 장점을 지니고 있다.

스테링 극저온냉동기 피스톤/변위기의 작동은 그림 3에 나타난 이상적인 스테링 극저온냉동기와는 달리 연속적인 정현파로 구현되며, 압축기와 변위기는 일정한 위상차를 유지하여야 한다. 따라서 압축 및 팽창 과정은 등온과정과 차이가 발생하며, 기계적인 구조에 따라 불용체적 및 압력손실이 발생하기 때문에 이상적인 사이클과는 차이가 발생하게 된다.

스테링 극저온냉동기는 압축기와 팽창기의 배치에 따라, 일체(integral)형과 분리(split)형으로 구분되며, 압축기 피스톤 구동 방식에 따라 회전모터를 사용하는 회전형과 선형모터를 사용하는 선형압축기형으로 분류할 수 있다. 또한 변위기의 구동방식에 따라 강제구동(motorized displacer) 방식과 자유변위기(free displacer) 방식으로 구분할 수 있다.

일반적으로 최근에는 분리형 선형압축기 구동방식의 스테링 극저온냉동기가 회전 일체형 스테링 극저온냉동기에 비해 비교적 큰 냉동능력과 긴 수명의 장점이 있어 활용도가 증대되고 있으나, 열역학적 효율 및 소형·경량화의 측면에서는 회전 일체형 스테링 극저온냉동기가 많은 장점을 지니고 있다.^[3]

그림 4는 2002년 ICEC(International Cryogenic Engineering Conference)에서 발표된 CILTEC의 극저온냉동기 데이터베이스^[4]에 근거한 소형 스테링 극저온냉동기의 냉동능력별 입력전력 및 중량을 나타낸 그림이다. 선형압축기 구동방식의 경우 냉동기의 전체중량이 수 Kg에 이르며 주로 0.5 W 이상의 큰 냉동능력

범위에서 많이 사용되어지는 반면 회전형의 경우 0.5 W 이하의 냉동능력과 1 Kg 이하의 경량을 특징으로 하고 있음을 알 수 있다. 또한 소형 극저온냉동기 기술수준은 단위 냉동능력 당 약 30W 이상의 입력전력 및 1 Kg 이상의 시스템 중량임을 알 수 있다.

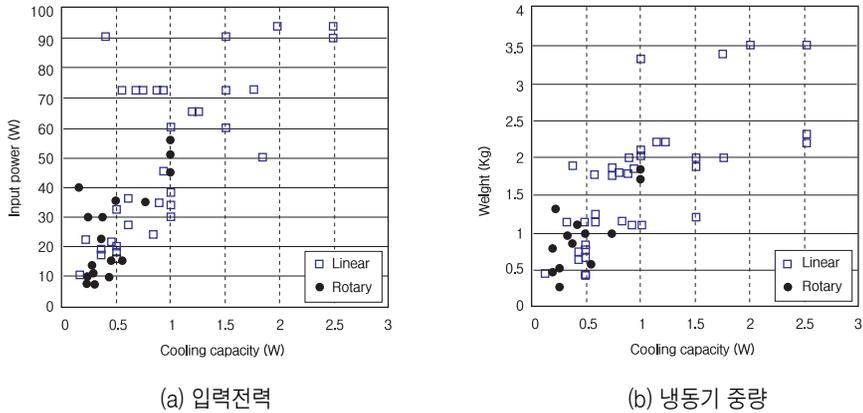
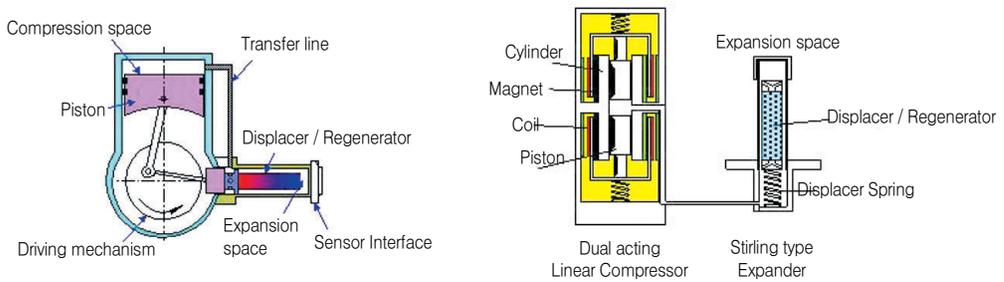


그림 4. 스텔링 극저온냉동기의 특성

그림 5는 회전일체형 및 분리형 선형압축기 구동 스텔링 극저온냉동기의 대표적인 기계구조를 나타낸 그림이다. 분리형 선형압축기 구동 스텔링 극저온냉동기는 두개의 피스톤을 대칭적으로 배치하여 압축기의 진동을 억제하고, 선형모터를 채용하여 피스톤에 미치는 측력(side force)을 감소시키는 구조를 채택하고 있는 반면, 회전일체형 스텔링 극저온 냉동기는 압축기 피스톤과 팽창기를 L자형으로 배치하고, 회전모터에 의한 회전운동을 크랭크 기구를 통해 직선운동으로 변환하는 기계구조를 채택하고 있다.

분리형 스텔링 극저온냉동기는 압축기에서 발생된 압력에 의해 변위기의 변위 및 위상이 결정되나, 회전일체형 스텔링 극저온냉동기는 회전모터에 연결된 크랭크 기구에 의해 압축기 피스톤 뿐만 아니라 변위기의 변위 및 위상이 제어되는 특징을 지니고 있다. 따라서 회전 일체형 스텔링 극저온냉동기는 분리형에 비해 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관(split tube)의 체적을 최소화할 수 있으나, 압축열이 팽창부에 전달되지 않도록 충분한 방열구조를 가져야 한다.



(a) 회전일체형 스텔링 극저온냉동기

(b) 분리형 선형압축기 구동 스텔링 극저온냉동기

그림 5. 스텔링 극저온냉동기의 개략도

또한 선형압축기형의 경우 선형압축기 피스톤의 변위를 제어함으로써 냉동기의 용량제어를 수행하는 반면 회전형의 경우 회전모터의 회전수를 제어함으로써 이를 수행하는 차이점이 있으며, 분리형 스테어링 냉동기가 적외선 검출기와 냉각부를 열적으로 연결하기 위해 fuzz 버튼을 사용하는 반면, 기동 및 휴대용 열상 장비의 적외선 검출기 냉각을 위한 극저온 회전 일체형 스테어링 냉동기는 냉각부에 검출기를 부착하기 위한 인터페이스를 채택하고 있다.

그림 6은 독일 AIM사의 냉동능력 1W급 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 구조를 나타내고 있다.^[5]



그림 6. AIM사 회전 일체형 스테어링 극저온냉동기(HD 1033)

스테어링 극저온냉동기의 주요한 설계인자로는 압축 및 팽창공간의 행정체적비, 고온부와 저온부의 온도비, 고온부와 저온부의 불용체적비, 압축기와 변위기의 위상각, 충전압력, 운전주파수 등이 있으며, 스테어링 극저온냉동기의 주요한 손실요인은 다음과 같다.

(1) 정적손실

- 열전도손실: 고온에서 극저온의 매우 큰 온도구배가 발생하는 팽창기 및 재생기 실린더, 재생기내의 재생물질, 듀어 벽, 검출기 신호선 등을 통한 열전도 손실로, 낮은 열전도 재질의 사용 또는 실린더 두께의 조절을 통해 제어할 수 있다.
- 대류열손실: 저온부 주위에서 발생하는 대류로 인해 발생하는 열손실로, 스테어링 극저온냉동기의 저온부를 고진공의 듀어내에 설치함으로써 억제할 수 있다.
- 복사열손실: 고온의 주위로부터 저온부로의 복사열전달로 인해 발생하는 열손실로, 표면 처리를 통해 표면 방사율을 낮게 유지하여야 한다.
- 검출기 접촉저항: 냉동기의 저온부와 검출기의 접촉부의 불완전한 열접촉으로 발생하는 열저항으로, IDCA 구조를 채택함으로써 최소화할 수 있다.

(2) 동적손실

- 셔틀열손실: 큰 온도구배를 갖는 변위기의 왕복운동으로 인해 발생하는 열손실로써 변위기의 변위를 최적화함으로써 최소화할 수 있다.
- 부기손실: 변위기와 팽창실린더 간극에서 발생하는 에너지손실로 간극을 최소화함으로써 제어할 수 있다.

- 유동손실 : 스테링 극저온냉동기 각 요소에서 발생하는 압력손실로써, 팽창공간의 압력손실은 이론냉동능력(gross refrigeration)의 감소를 유발한다. 유동손실의 감소를 위해서는 급격한 유로 형상 및 단면변화를 최소화하여야 한다.
- 불완전 열교환 : 재생기에서의 불완전한 열교환 및 압축부의 불완전한 방열은 냉동능력의 감소 및 입력전력의 증가를 유발한다.
- 기계마찰손실 : 크랭크축 베어링 및 피스톤 등 구동부의 마찰로 인해 발생하는 손실로써, 구동부의 마모는 스테링 극저온냉동기의 수명을 제한하는 주요한 원인이 된다.
- 전기모터손실 : 냉동기를 구동하는 전기모터의 손실로써 기계구조의 최적화를 통해 급격한 토크 변화를 최소화하여야 한다.

회전일체형 스테링 극저온냉동기에서 피스톤에 작용하는 축력은 중요한 수명을 제한하는 요인이다. 이를 최소화하기 위해 크랭크-커넥팅로드(connecting rod), 트렁크(trunk) 피스톤, 스카치요크(scotch yoke) 등 다양한 형태의 피스톤 구동메커니즘이 제안되었다. 또한 초기의 직류 회전모터는 브러시로 인해 냉동기의 신뢰성을 크게 손상하였으나, BLDC (Brushless D. C. Motor)의 도입으로 획기적인 수명 및 신뢰성의 개선을 도모할 수 있게 되었다.^[6] 그림 7은 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 냉각특성을 나타내는 그림으로, 주요한 설계인자의 하나인 냉동기 충전압력이 증가함에 따라 냉각시간이 크게 감소함을 알 수 있다.

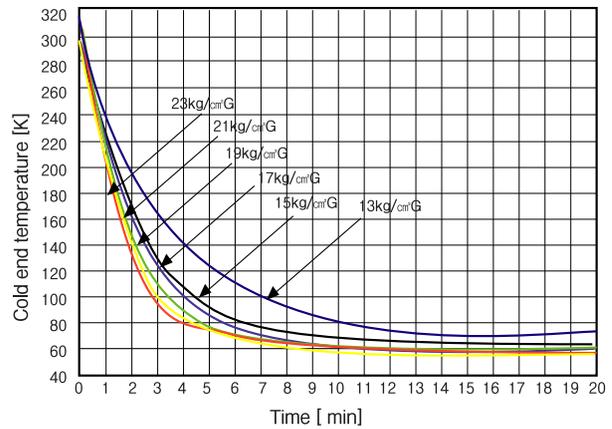


그림 7. 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 냉각특성

4. 회전 일체형 스테링 극저온냉동기의 개발동향

1950년대 적외선검출기의 개발 이래, 스테링, Vuilleumier, Gifford-McMahon, Solvay 등 다양한 형태의 극저온냉동기들이 개발되었다. 이와 같은 극저온냉동기의 개발에 있어서 충분한 냉동능력을 발휘할 수 있는 소형, 경량, 전력소모, 수명, 저소음, 전자기간섭 등은 주요한 개발 목표로 자리 잡고 있다.

표 3. 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 요구사항

구 분	목표성능
구 조	Rotary Integral Stirling Cooler
무 게	< 500g
냉각능력/냉각온도	0.5~1.0 W / 77K(-196℃)
cold finger 직경	< 8mm
구동전압/소모전력	20~30 VDC / 7~15 W
MTTF	10,000 hrs
환경시험	민수분야: 수요자요구형, 군수분야: 군사규격(MIL-STD-810C)

초점면배열 적외선 검출기, 듀어, 제어기, 극저온냉동기를 표준화하기 위한 SADA(Standard Advanced Dewar Assembly)^[7]의 제정은 적외선 검출기의 공통모듈로서 스테어링 극저온냉동기의 대량생산 및 지속적인 연구개발을 가능케 하였다.

최근 주요한 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 제작사인 독일 AIM, 네덜란드 Thales Cryogenics, 이스라엘 Ricor, 미국 FLIR, Carleton사 등은 소형화, 고 효율화와 더불어 수명증대에 연구를 집중하고 있는 상황이다. 표 3은 초점면배열 적외선 검출기 냉각용 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 주요한 요구사항을 나타낸다.

그림 8은 이스라엘 Ricor사의 적외선 검출기와 결합된 회전일체형 스테어링 극저온냉동기로, 휴대용 적외선 카메라용으로 개발된 중량 260g, 냉동능력 0.17W급의 냉동기이다. Ricor사는 수명 향상을 위해 모터와 제어기를 냉동기와 분리하여 고압의 헬륨에 노출되지 않도록 함으로써 5,000시간 이상의 MTTF를 보고하고 있으며, 육상용으로 K508, 항공용 K548을 개발한 바 있다. Ricor사의 주요한 개발사항은 다음과 같다.^[8]

- 금속 간극 Seal 적용
- 피스톤 세라믹 코팅 기술
- 분리형 모터 채용
- 변위기 유연링크 채용
- 특수 베어링 채용
- 금속재질 헬륨 누설 방지기구 도입

FLIR사는 고온초전도 응용장치 및 QWIP(Quantum Well Infrared Photoconductor) 냉각용 회전일체형 스테어링 극저온냉동기를 개발하여, 중량 300g, 최대냉동능력 0.445W, 자사의 시험기준에 의한 실증 MTTF 8,000시간을 보고하고 있으며, 냉동능력 0.39~0.65 W급(중량 275~470g, 입력전력 5~14W)의 소형 회전일체형 스테어링 극저온냉동기를 개발한 바 있다. FLIR사의 주요한 개발사항은 다음과 같다.^[9]

- BLDC 모터 효율 개선
- 일체형 팽창기 개발
- 압축기 및 팽창기 간극 최소화
- 압축기 피스톤 유연링크 개발
- 재생기(laminated screen) 효율개선
- 낮은 충전압력 및 압축비 채용
- 금속재질 헬륨 누설 방지 기구 도입

이상과 같이 압축기/팽창기의 간극, 피스톤/변위기 구동 메카니즘, 누설 제어기구 등의 개선을 통해 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 성능향상을 도모하고 있음을 알 수 있다.



(a) Ricor사, K560



(b) FLIR사, MC-3

그림 8. 소형 회전일체형 스테링 극저온냉동기 개발동향

극저온냉동기의 수명은 적외선 검출기 시스템의 전체 신뢰성에 지대한 영향을 미치며, 보다 긴 수명의 극저온냉동기에 대한 수요는 지속적으로 증대되고 있으며, 지속적인 연구개발에 힘입어 극저온냉동기의 수명은 1980년대 수 백 시간에서 현재 수 천 시간에 이르는 괄목할 만한 수준으로 개선되고 있다. 이에 따라 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 MTTF를 효율적으로 실증하기 위해 가혹한 환경 시험조건에 의한 가속수명시험(HALT, Highly Accelerated Life Test) 기술의 적용^[8, 10]이 시도되고 있으며, 축적된 수명시험 결과와 FMECA(Failure Mode Effect Critical Analysis)를 통한 MTTF 예측기술 개발이 진행되고 있어, 머지않은 장래에 선형압축기 구동 스테링 극저온냉동기 수준의 MTTF를 달성할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

베어링, 헬륨 누설방지 기구, 회전모터 및 전류도입선, 기체방출(outgasing), 코팅 등은 회전 일체형 스테링 극저온냉동기의 수명을 제한하는 주요한 요인이다. 표 4는 5개의 베어링을 장착하고 있는 Thales Cryogenics사의 회전일체형 스테링 극저온냉동기 RM2/02에 대한 MTTF 예측 예^[11]를 나타내고 있다.

표 4. 회전 일체형 스테링 극저온냉동기의 MTTF 예측

Item	MTTF (hrs)	Remarks
Bearing 1	154,600	
Bearing 2	191,000	
Bearing 3	186,600	
Bearing 4	119,000	
Bearing 5	367,700	2 bearings 5 / cooler
Helium seals	71,000	Conservative value
Electrical components	71,000	Conservative value
Outgasing	35,500	
Coating	71,000	Conservative value
Cooler	9,870	

5. 결론

4세대 초점면 배열 적외선 검출기는 1~3세대의 적외선 검출기에 비해 획기적으로 선명한 영상의 구현, 휴대 용이성 및 정확한 온도분포의 구현이 가능하며, 군사, 산업, 의료 분야의 다양한 요구를 만족시킬 수 있어 활발한 응용이 기대된다. 적외선 검출소자의 냉각요구온도에 대한 대응성, 이동성을 고려한 시스템 중량 및 소요전력, 수명, 냉각기/듀어 통합형의 특성을 요구하는 초점면 배열 방식의 적외선 검출기는 분리형 스테링 극저온냉동기에 비해 열효율이 높고, 경량화가 용이한 회전 일체형 스테링 극저온냉동기가 채용

되고 있으며, 이에 따라 활발한 연구개발이 진행되고 있다.

국내에서도 초점면배열 적외선검출기의 활용도가 증가함에 따라 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 수요가 증대되고 있어, 이에 대응하기 위한 개발의 필요성이 제기되고 있다.

참고문헌

- [1] Maxtech International Inc., The World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems, Maxtech International Inc., 2001
- [2] R. A. Ackermann, Cryogenic Regenerative Heat Exchangers, Plenum Press, 1997
- [3] G. Walker, Cryocoolers Part 2: Applications, Plenum Press, 1983
- [4] H. J. M. Ter Brake, State-of-the-art review on low-power cryocoolers, Proceedings of the 19th ICEC, pp. 307 - 314, 2002
- [5] http://www.aim-ir.com/english/products/coolers_hd1033.html
- [6] G. Walker, Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics, Clarendon Press, Oxford, 1989
- [7] W. E. Salazar, Status Report on the Linear Drive Coolers for the Department of Defense Standard Advanced Dewar Assembly (SADA), Cryocoolers 12, pp. 17 - 25, 2003
- [8] Yoav Zur, Rotary Cooler Status, M-CALC IV, San Diego, CA, 2003
- [9] Uri Bin-nun, Pat Frisoli, Long Life Low Cost Coolers, M-CALC IV, San Diego, CA, 2003
- [10] G. R. Pruitt, T. M. Davis and B. A. Ross, Methods for Accelerated Life Evaluation of Long-Life Cryocoolers, Preprint of CEC/ICMC, 2003
- [11] J. M. Cauquil, J. Y. Martin, P. Bruins and T. Benschop, MTTF Prediction in Design Phase on Thales Cryogenics Integral Coolers, Cryocoolers 12, pp. 87 - 94, 2003



홍 용 주

· 한국기계연구원 열유체공정기술연구부 선임연구원
· 관심분야 : 극저온 냉동기, 마이크로 열교환기
· E-mail : yjhong@kimm.re.kr



박 성 제

· 한국기계연구원 열유체공정기술연구부 선임연구원
· 관심분야 : 극저온 냉동기, 공조냉동기기
· E-mail : sjpark@kimm.re.kr



김 효 봉

· 한국기계연구원 열유체공정기술연구부 선임기술원
· 관심분야 : 극저온 냉동기, 공조냉동기기
· E-mail : hyobong@kimm.re.kr