

초소형 일체형 스테어링 극저온냉동기 개발

| 한국기계연구원

[요약문]

획기적으로 선명한 영상의 구현, 휴대 용이성 및 정확한 온도분포의 구현이 가능한 초점면 배열 방식의 적외선 검출기는 탐지도 및 분해능 향상을 위해 액체질소 온도수준의 극저온냉각을 요구한다. 냉동기의 저온부에 적외선 검출기를 직접 부착하는 일체형 스테어링 극저온냉동기는 효율적인 적외선 검출기의 냉각이 가능할 뿐만 아니라, 소형/경량화가 용이하여, 기동 및 휴대용 열상장비용 극저온냉각을 위해 많이 활용되고 있다.

적외선 검출기 냉각용 극저온냉동기는 다양한 열/진동/충격/전자파 등의 운용환경 조건에서 검출기를 액체질소 온도수준으로 냉각/유지할 수 있어야 하며, 안정적인 시스템의 운용을 위한 충분한 신뢰성이 확보되어야 한다. 본 고에서는 민간 겸용기술사업을 통해 국내에서 개발된 열상장비 냉각용 일체형 스테어링냉동기의 기술적 특징 및 환경/신뢰성 시험 결과를 소개하고자 한다.

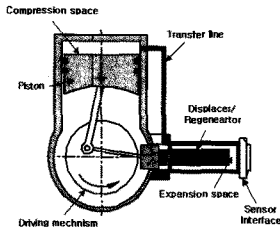
1. 서론

InSb, HgCdTe 등의 반도체소자로 구성되는 적외선검출기는 근적외선에서 원적외선에 이르는 광범위한 파장 영역의 적외선을 검출하여 이를 영상화하는 기기로, 최근에는 집적회로 기술의 발전에 힘입어 픽셀수 640×480 혹은 그 이상의 대형/고해상도의 초점면배열(FPA, Focal Plane Array)까지 개발되어, 과거의 적외선 검출기에 비해 획기적으로 선명한 영상의 구현, 휴대 용이성 및 정확한 온도분포의 구현이 가능하여 군사, 산업, 의료 분야의 다양한 요구를 만족시킬 수 있는 기술수준에 도달하였다.^[1]

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 소형/경량/저진동의 극저온냉동기가 요구된다.

일체형 스테어링(Stirling) 극저온냉동기/적외선검출기(IDCA, Integrated Dewar/Cryocooler Assembly)는 팽창기의 저온끝단에 적외선 검출기를 직접 부착하여 사용하는 방식으로, 냉동기와 적외선검출기가 분해/결합이 가능한 분리형에서 냉동기의 저온끝단과 적외선 검출기를 열적으로 연결하는 링크를 사용함으로써 발생하는 냉동기와 검출기의 온도차를 최소화할 수 있어 냉동기의 열부하를 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 낮은 전력으로 운용이 가능한 장점을 지니고 있다.^[2,3]

개발 일체형 스테어링 극저온냉동기는 그림 1에 나타낸 바와 같이 BLDC(Brushless DC motor) 방식의 회전모터 및 모터에 의한 회전운동을 직선운동으로 변환하는 크랭크 기구, 압력파형을 발생시키는 압축피스톤 및 실린더로 구성된 회전형 압축기와 극저온의 환경을 유지, 생성하기 위한 재생열교환기(regenerator), 강제구동 방식의 변위기(displacer)로 구성된 팽창기, 압축기와 팽창기를 연결하는 연결관으로 구성되며, 압축기 및 팽창기는 하나의 하우징에 결합되는 일체형 구조^[4]이다.



Item	Specification
Type	Integral / Rotary
Cooling capacity	> 500 mW @80 K
Input power	< 15 W
Input voltage	20 ~ 30 VDC
Dia. of cold finger	< 8 mm
Weight	< 500 g

그림 1. 일체형 스테링냉동기 구조 및 개발 냉동기 사양

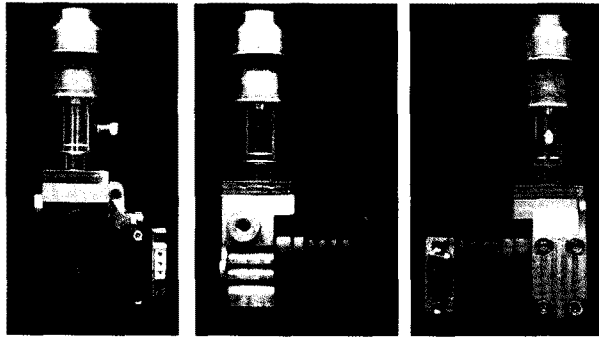


그림 2. 모사적외선검출기를 부착한 개발 냉동기

스테링 극저온냉동기는 고압/고순도의 헬륨가스로 충전되며, 압축기 피스톤과 팽창기의 변위기는 효율적인 극저온의 발생 및 유지를 위해 일정한 위상차를 유지하여야 한다. 압축기 피스톤에 의해 압축된 헬륨가스가 연결관 및 재생기를 통해 팽창공간으로 유입되는 과정 중 변위기내에 충전된 재생물질과의 열전달을 통해 충분히 냉각되고, 팽창공간의 연속적인 체적변화(팽창)에 의해 극저온이 발생되고 유지된다.^[6]

일반적으로 스테링 극저온냉동기는 초기 냉각과정에서는 짧은 냉각소요시간을 위해 최대의 입력전력으로 운전되나, 설정온도(80 K)에 도달한 이후에는 경제적인 운전을 위해 최소의 입력전력으로 운전된다. 이때 냉동기의 제어 방식은 회전형 압축기의 경우 회전수의 제어를 통해 수행되며, 압축기의 회전수를 제어하는 제어기는 저온끝단에 부착된 온도센서의 신호를 통해 피드백제어를 수행한다.

정상상태의 냉동기는 주위로부터의 열부하 및 적외선 검출기의 열부하와 평형을 이루는 냉동능력의 상태로 운전되며, 주위로부터의 열부하에 따라 정상상태의 운전조건이 변화하게 된다.^[6] 스테링 극저온냉동기는 다양한 열적환경에 노출되어 운용되며, 이와 같은 운용환경에서도 주어진 입력전력 조건에서 저온끝단의 온도를 일정하게 유지할 수 있어야 하며, 장시간의 운전에도 안정적인 냉각성능을 발휘할 수 있는 신뢰성을 확보하여야 한다.

2. 적외선검출기 냉각용 일체형 스테링 극저온냉동기

2.1 기본성능

스테링 극저온냉동기의 기본성능으로는 제원 측면의 치수, 중량, 절연저항, 헬륨가스 누설률과 냉동기로 공급되는 전원의 전압변동에 따른 냉각특성, 무부하 및 부하시의 냉각특성, 정상상태에서의 제어 온도 안정성 등이 있다.

표 1은 개발 냉동기에 대한 기본성능 평가기준 및 시제품 3조에 대한 성능시험결과를 나타낸다. 개발 냉동기는 소형/경량화를 위해 내장제어기 방식을 채택하고 있으며, 기존의 열상장비 적용을 위해 71×58×123 mm 이내의 치

수조조건으로 설계/제작 되었으며, 휴대 및 이동용 열상장비의 적용성을 확보하기 위한 500 g 이하의 무게 요구조건 역시 40 g 이상의 여유를 가지고 만족하고 있다. 냉동기의 전기적 안정성 확보를 위해 전원단자와 냉동기와와의 절연 저항은 요구하고 있는 평가기준인 100 MΩ 이상을 만족하였으며, 냉동기의 저장 및 장시간의 운전에서의 냉각성능을 보장하기 위한 헬륨가스 누설률 역시 평가 기준을 모두 만족하였다.

냉동기의 냉각성능 측정을 위해 냉동기를 열부하 200 mW 미만급(상온조건)의 모사검출기와 결합하여 시험하였으며, 상온으로부터 80 K까지 도달하는데 소요되는 냉각시간은 상온조건에서 모두 4분 이하로 측정되었으며, 냉동기 저온부의 최저도달온도는 60 K 이하로 나타났다. 또한 총 열부하 500 mW의 조건에서도 모사검출기의 냉각온도가 80 K 이하의 온도로 유지되어, 냉동능력 500 mW의 개발목표사양을 충족하고 있음을 알 수 있다.

이때 냉동기의 최대 입력전력은 목표사양인 15 W 이하의 조건을 만족하고 있으며, 저온(-32 ℃) 및 고온(60 ℃)의 주위환경온도 조건에서도 냉동기의 성능이 요구성능을 상회하는 것으로 나타났다.

적외선 검출기 냉각용 스테링 극저온냉동기는 냉각초기에는 빠른 냉각시간을 확보하기 위해 최대의 전력을 냉동기로 공급하여야 하나, 적외선 검출기가 동작하는 정상운전시에는 최소의 입력전력으로 안정된 냉각온도를 유지하여야 한다. 따라서 냉동기의 구동을 제어하는 제어기는 모사검출기의 냉각온도 변화를 빠른 시간에 검출하여 안정적인 제어를 수행하여야 한다. 이와 같은 냉동기 제어기의 특성은 제어 온도의 안정성을 통해 평가할 수 있다. 온도안정성의 평가를 위해 저온/상온/고온의 환경온도 조건에서 15 분간 냉동기를 가동한 후, 1 분동안의 냉각온도를 측정하였으며, 측정된 냉동기의 제어온도 편차는 0.5 K 미만으로 환경조건의 변화에도 매우 안정적인 온도제어 성능을 유지하였다.

이상과 같은 시험결과는 개발 냉동기가 제원 및 성능 측면에서의 적외선 검출기 냉각용 스테링 극저온냉동기로서의 요구조건을 충족함을 나타낸다.

표 1. 개발 냉동기의 기본성능 시험결과

순번	평가 항목	평가기준	평가방법	시제품 (I)	시제품 (II)	시제품 (III)	
1	치수	71 × 58 × 123 mm 이하	냉동기 치수(가로x세로x높이)를 확인	충족	충족	충족	
2	중량	< 500 g	더미 장착 냉동기 무게	453 g	453 g	452 g	
3	절연 저항	≥ 100MΩ	전원입력부와 접지간의 저항을 DC 250 V의 절연저항계로 측정	≥ 100 MΩ	≥ 100 MΩ	≥ 100 MΩ	
4	헬륨 가스 누설률	≤ 6.0×10 ⁻⁸ mbar. ℓ /sec	모터-제어조립체를 분리한 후 냉동기를 진공챔버내에 넣고 헬륨가스 누설률을 확인	5.0×10 ⁻⁸	3.0×10 ⁻⁸	3.5×10 ⁻¹⁰	
5	전압 변동률	22 Vdc	제어설정 온도 안정률 ≤ ±0.5 K 냉동기 전원을 15분간 인가한 후, 1 분간의 표준듀어의 냉각온도데이터 수집, 온도편차 계산	0.1 K	0.1 K	0.1 K	
		28 Vdc		0.1 K	0.1 K	0.1 K	
		32 Vdc		0.1 K	0.1 K	0.1 K	
6	최대 냉각 시험	무부하	-32 ℃	≤ 70 K (-203 ℃) 냉동기 가동 15분 이후 표준듀어의 냉각온도 확인	49.6 K	48.1 K	45.8 K
			20 ℃		57.5 K	53.3 K	52.5 K
			60 ℃		63.6 K	60.5 K	59.6 K
		부하	-32 ℃	≤ 76 K (-197 ℃) 냉동기 가동 15분 이후, 표준듀어에 추가부하를 인가한 후 안정화된 냉각 온도 확인 (부하:140 mW(-32/20 ℃), 200 mW(60 ℃))	55.3 K	52.9 K	54.7 K
			20 ℃		62.6 K	58.2 K	66.5 K
			60 ℃		72.9 K	68.6 K	70.4 K



순번	평가 항목	평가기준			평가방법	시제품 (I)	시제품 (II)	시제품 (III)
6	최대 냉각 시험	500 mW 부하	20 °C	≤ 80 K (-193 °C)	냉동기 가동 15분 후, 표준듀어에 전 체부하 500 mW를 인가한 후, 안정화 된 표준듀어의 냉각온도 확인	70.5 K	66.0 K	71.8 K
7	냉각 제어 성능 시험	냉각 시간	-32 °C	≤ 9분 (@80 K ±3K)	냉동기 가동 이후, 냉각 완료 시점(80 ±3K)까지 걸리는 시간을 측정	2분20초	2분30초	2분34초
			20 °C			3분11초	3분30초	3분38초
			60 °C			4분28초	4분30초	4분23초
	최대소비 전력	20 °C	≤ 15 W	냉동기 가동 이후, 냉각 완료 시점(80 ±3K)까지 측정된 최대 소비전력을 확인	11.70 W	11.94 W	11.43 W	
제어온도 안정화	제어온도	-32 °C	제어설정 온도안정률	냉동기 가동 15분 이후, 1분간의 표준듀어의 냉각온도 데이터 수집, 온도편차 계산	0.1 K	0.1 K	0.1 K	
		20 °C	0.1 K		0.1 K	0.1 K		
		60 °C	≤ ±0.5 K		0.1 K	0.1 K	0.1 K	

2.2 환경성능

적외선검출기 냉각용 스테어링 극저온냉동기는 광범위한 환경조건에서 운용가능하여야 한다. MIL 규격⁷⁾에서는 냉동기의 저장온도 및 동작온도 등의 온도환경, 진동/충격, EMI/EMC 등의 운용조건을 규정하고 있으며, 표 2는 관련 환경규격을 나타낸다.

환경시험은 시험 전 성능시험, 고온저장, 고온동작, 시험 후 성능시험의 순으로 진행하여, 시험 전/후의 냉동기의 성능변화 발생여부를 판정하였으며, 이 후 저온저장, 저온동작, 시험 후 성능시험의 순으로 저온시험을 수행하였다. 한편 진동 및 충격시험은 냉동기를 시험용 지그에 고정된 후 진동 및 충격시험기에 장착하여 상온의 온도조건에서 수행하였으며, 시험 전후의 냉동기의 성능변화 발생을 파악하기 위해 냉각시간, 제어온도의 안정상태, 헬륨가스 누설률을 측정하였다.

표 3은 각 시험항목의 시험 후 냉동기 성능을 나타낸다. 냉동기의 성능은 3개의 평가항목에서 모두 기준을 충족하였다. 이와 같은 시험결과는 개발 스테어링 극저온냉동기가 MIL 규격이 제시하고 있는 환경 운용조건에서 운용가능함을 나타낸다.

표 2. 스테어링 극저온냉동기 환경규격

항 목		기 준	비 고
고온	고온 동작	+60 °C, 8 hrs	MIL-STD-810
	고온 저장	+71 °C, 48 hrs	
저온	저온 동작	-32 °C, 8 hrs	
	저온 저장	-57 °C, 24 hrs	
진동		5~25 Hz, 1 g 25~36 Hz, 0.762 g 36~500 Hz, 2 g	
기본충격		30 g, 11 ms	
발포충격		X축 : 100 g, 1 ms Y축 : 100 g, 1 ms Z축 : 100 g, 1 ms	

표 3. 스테링 극저온냉동기 환경시험결과

순번	평가항목		평가기준	시험결과				
				고온시험	저온시험	진동시험	기본충격	발포충격
1	냉각제어 성능 (상온조건)	냉각시간	≤ 9분	3분42초	3분42초	3분42초	3분48초	3분52초
2		제어온도 안정화	제어설정온도 안정률 ≤ ±0.5K	0.0 5K	0.05 K	0.06 K	0.04 K	0.06 K
3	헬륨가스 누설률		≤ 6×10 ⁻⁶ mbar. ℓ /sec	5.0×10 ⁻¹¹	6.0×10 ⁻¹¹	2.8×10 ⁻⁸	2.4×10 ⁻⁸	2.0×10 ⁻⁸
평가				기준충족	기준충족	기준충족	기준충족	기준충족

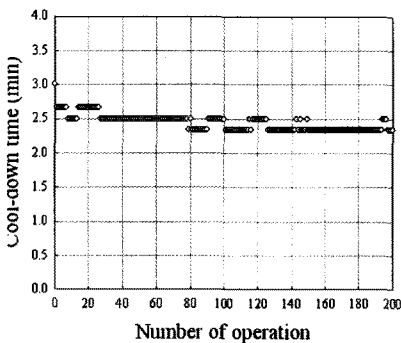
2.3 신뢰성시험

적외선 검출기 냉각용 스테링 극저온냉동기는 활용기간 동안 장시간의 동작시간 및 다수의 전원개폐를 요구하고 있다. 개발된 스테링 극저온냉동기의 신뢰성을 검증하기 위한 방안의 일환으로 연속운전 및 반복적인 전원개폐 시험을 포함한 4종의 시험을 실시하였다.

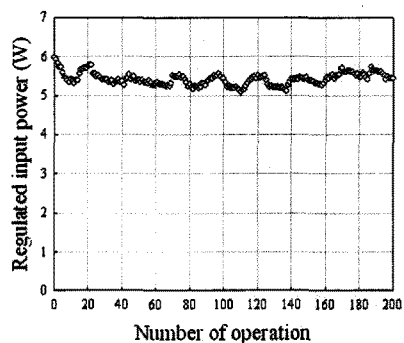
2.3.1 전원개폐시험

스테링 극저온냉동기의 반복적인 냉각으로 인해 발생하는 저온부의 열충격에 대한 신뢰성을 검증하기 위한 방안의 일환으로 개발냉동기에 대해 전원개폐 시험을 수행하였다.

전원개폐시험은 상온조건에서 30분 냉각/30분 정지 사이클을 반복 실시하여, 시험 중 200회의 저온부 냉각을 반복하였다. 그림 3은 시험결과로, 200회의 냉각과정에서의 냉각시간 및 정상상태 냉동기의 입력전력을 나타낸다. 시험결과 반복적인 열충격에도 냉각온도에 도달하는 시간의 지연이 발생하지 않았으며, 입력전력의 큰 변화가 발생하지 않았다. 또한 시험 전/후의 냉각특성에서도 변화가 발생하지 않는 것으로 나타나, 개발 냉동기는 수백회 이상의 전원개폐의 상황에서도 안정적인 냉각 및 제어를 수행할 수 있음을 입증하였다.



(a) 냉각시간



(b) 정상상태 냉동기 입력전력

그림 3. 냉동기 개폐운전(200회) 시험

2.3.2 제어운전시험

적외선 검출기의 냉각을 위한 스테링 극저온냉동기는 냉동기에서 설정된 온도에서 안정적으로 동작하여야만 적외선 검출기의 안정적인 광성능을 구현할 수 있다. 냉동기의 온도제어 기능은 냉동기 제어기의 주요한 기능의 하나



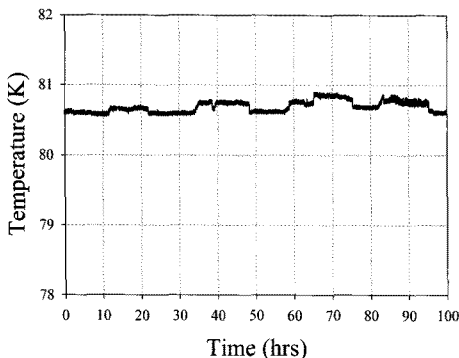
로, 개발 스테어링냉동기가 연속적으로 동작할 때 제어기의 동작특성을 검증하기 위해 제어운전시험을 수행하였다.

그림 4는 100 시간 동안의 저온부의 온도변화 및 입력전력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초기 냉각 이후 개발 스테어링 극저온냉동기는 목표로 하는 냉동기의 온도안정률 ± 0.5 K 이하의 온도변화를 나타냄을 알 수 있다. 이때 냉동기에서 소모되는 입력전력 역시 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 안정적으로 유지되었다.

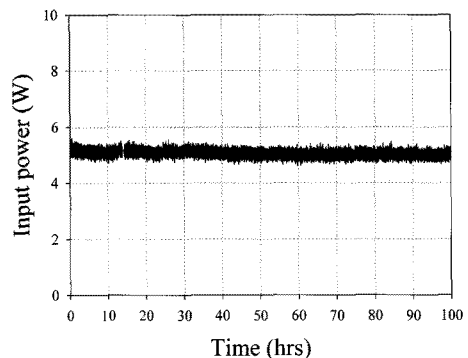
표 4는 냉동기 운전 1 시간 이후부터 101 시간까지 100 시간동안의 온도 및 입력전압/전력 측정결과를 제시하고 있다. 측정결과 냉동기의 온도 표준편차는 0.1 K 미만이고, 측정된 최대온도차는 0.37 K로 나타나, 제어기의 온도안정 기능이 장시간의 연속운전에도 적합한 성능을 확보한 것으로 판단된다.

표 4. 제어운전(100시간) 시험결과

항목	결과
평균온도(표준편차) / 최고온도 ~ 최저온도	80.69 K (± 0.084 K) / 80.54 K ~ 80.91 K
평균인가전압(표준편차)	28.14 VDC (± 0.12 VDC)
평균소모전력(표준편차) / 최소전력 ~ 최대전력	4.436 W (± 0.127 W) / 3.98 W ~ 5.59 W



(a) 냉각온도



(b) 냉동기 입력전력

그림 4. 냉동기 제어운전(100시간) 시험

2.3.3 연속운전시험

개발 스테어링 극저온냉동기의 내구 및 신뢰성을 파악하기 위해, 냉동기의 개폐동작없이 연속운전시험을 수행하였다. 시험은 냉동기의 저온부가 대기에 노출되어 있는 상황에서 24시간 연속적으로 냉동기의 운전을 실시하였다.

연속운전시험에서 냉동기의 인가전압은 시험 초기에는 28 VDC의 전원을 인가하였으나, 운전 712 시간 이후부터 24 VDC 전원으로 교체하여 시험을 진행하였다. 이에 따라 그림 5에 나타난 냉동기 회전수 및 입력전력은 712 시간 전후에 큰 변화가 발생하였다. 그러나 이 시간 이후에 일정한 전원이 공급되면서 냉동기의 운전특성은 안정화되었고, 누적운용시간 7,420 시간까지 안정된 3,000 RPM 이상의 회전수 및 7 W 미만의 소모(입력)전력을 나타내었다.

적외선 검출기의 냉각에서 상온조건의 스테어링 극저온냉동기의 정상 제어상태 회전수가 1,500 RPM 이하이고, 전체 냉동기의 운전시간에서 냉각과정의 과도상태가 차지하는 시간이 작음을 감안할 때 본 시험에서 얻은 3,000 RPM 이상의 연속적인 스테어링 극저온냉동기의 운전은 약 2배의 정상 운용시간으로 추정할 수 있다.

이를 감안할 때 개발 스테어링 극저온냉동기 피스톤/실린더/베어링/하우징/모터 등의 부품 내구성은 현재 시험을 통해 확보된 7,420시간의 약 2배인 15,000 시간 이상의 내구 및 신뢰성을 확보 및 검증하였다.

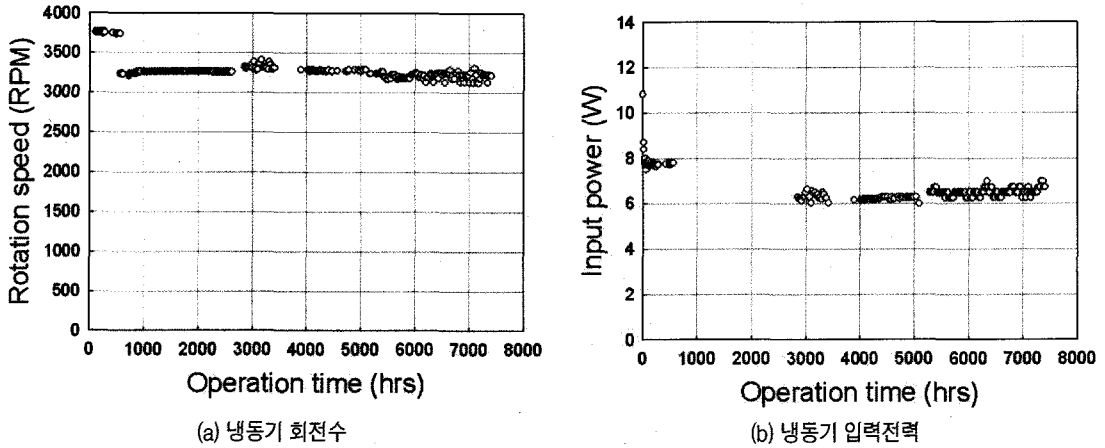


그림 5. 실온/대기 조건에서의 냉동기 연속운전 시험

2.3.4 MTTF 인증시험

개발 스테어링 극저온냉동기의 MTTF(Mean Time To Failure)를 인증하기 위해 MIL-HDBK-781의 Sequential test plan의 Test plan VII-D를 적용하여 MTTF 인증시험을 수행하였다. 표 5는 MIL-HDBK-781의 관련규정을 나타낸다.

표 5. 스테어링극저온냉동기 MTTF 인증시험 적용규정

항목	사 양
관련 규정	MIL-HDBK-781 / Sequential test plan VII-D
True risk (α / β)	29.3/29.9
Discrimination ratio (d)	2.0
10,000시간 인증 요구조건	냉동기 9대/최소시험일 40일(955.6시간)

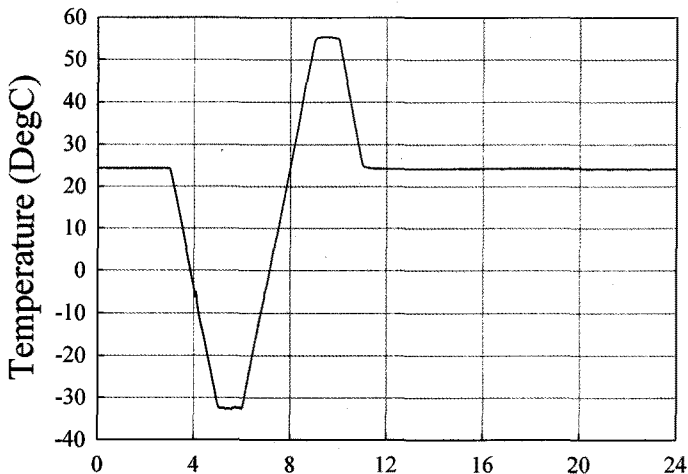


그림 6. 시험환경온도 프로파일



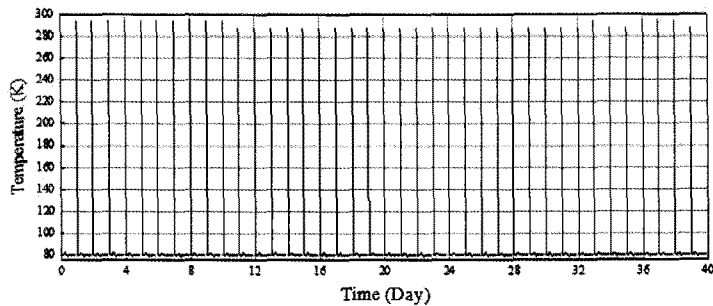
MTTF 인증시험은 총 9대의 개발 냉동기에 대해 수행하였으며, 9대의 냉동기가 시험기간 중 불량 발생하지 않을 때, 최소 40일의 시험일(960시간)이 요구된다.

시험은 냉동기의 운용조건을 모사하기 위해 냉동기를 환경챔버에 설치하고, 그림 6에 나타난 바와 같이 고온(+53 ℃)/상온(+23 ℃)/저온(-32 ℃)의 열환경조건으로 구성된 온도사이클을 반복하였으며, 냉동기는 20시간 운전 후 4시간 정지하는 사이클로 구동하였다.

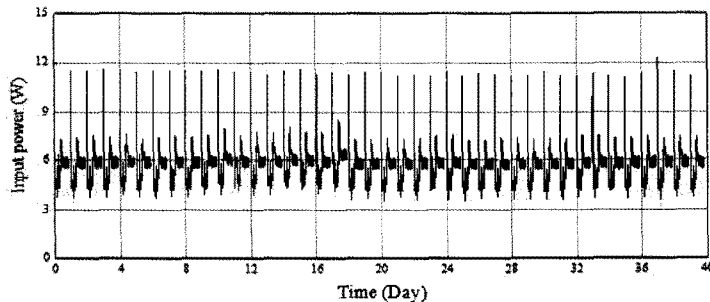
그림 8은 MTTF 인증시험 중 1대의 냉동기의 온도 및 입력전력을 나타내고 있다. 40일의 시험기간 중 냉동기의 성능의 변화는 발생하지 않았으며, 9대의 냉동기 모두가 시험 전/후 성능시험에서 기준을 충족하여, 시험을 통해 개발 스테어링 극저온냉동기의 목표인 10,000시간의 MTTF를 입증하였다.



그림 7. 시험장치 구성



(a) 온도



(b) 입력전력

그림 8. MTTF 인증시험 결과

3. 결 론

개발된 적외선검출기 냉각용 초소형 일체형 스텔링 극저온냉동기는 기본성능, 환경성능에서 MIL 규격의 요구조건을 만족하며, 전원개폐/제어운전/연속운전/MTTF 인증 시험을 통해 냉동기의 높은 신뢰성을 검증하였으며, 적외선검출기 적용시험, 체계적용시험 등의 개발시험 및 운용시험을 통해 군적합성 판정을 획득하였다.

개발 스텔링 극저온냉동기는 전자, 장갑차, 항공기 등의 전방 감시 적외선 장비, 사격통제 장치 등에 사용되는 초점면 배열 방식의 적외선 검출기의 냉각에 직접 적용될 수 있으며, 확보된 스텔링 극저온냉동기 기술을 통해 군사, 산업, 의료 분야에서 다양한 형태의 초전도센서 냉각 및 극저온 발생장치로의 응용이 기대된다.

❁ 참고 문헌

- [1] Maxtech International Inc., The World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems, Maxtech International Inc., 2001
- [2] G. Walker, Cryocoolers Part 2: Applications, Plenum Press, 1983
- [3] G. Walker, Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics, Clarendon Press, Oxford, 1989
- [4] S. J. Park, Y. J. Hong, H. B. Kim, Y. H. Kim, "A study on the performance characteristics of rotary type Stirling cryocooler", J. of KIASC, Vol. 8, NO. 1, pp. 54-58, 2006
- [5] I. Urieli, D. M. Berchowitz, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984
- [6] Y. J. Hong, S. J. Park, H. B. Kim, "Effects of the environmental temperature on the performance of the Stirling cryocooler", J. of KIASC, Vol. 11, NO. 3, pp. 65-68, 2009
- [7] United States Department of Defense, MIL-STD-810F, 01 JAN 2000



홍 용 주

- 한국기계연구원 그린환경에너지 기계연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : yjhong@kimm.re.kr



박 성 제

- 한국기계연구원 그린환경에너지 기계연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : sjpark@kimm.re.kr



김 효 봉

- 한국기계연구원 그린환경에너지 기계연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : hyobong@kimm.re.kr



고 준 석

- 한국기계연구원 그린환경에너지 기계연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초소형 극저온 냉동기
- E-mail : jsko@kimm.re.kr



고 득 용

- 한국기계연구원 그린환경에너지 기계연구본부 에너지기계연구실
- 관심분야 : 극저온 냉각 및 초전도 전력기기
- E-mail : dykoh@kimm.re.kr