

회전압축기형 스텔링 냉동기의 열환경 성능시험에 관한 연구

박성제[†]·홍용주*·김효봉*·김대웅**

A Study on Thermal Environmental Performance Test of the Rotary Compressor Stirling Cryocooler

SeongJe Park, YongJu Hong, HyoBong Kim, Dae Woong Kimm

Key Words: Integral Stirling cryocooler(일체형 스텔링 극저온 냉동기), cool down time(냉각시간), leak rate(누설율)

Abstract

This paper presents the results of a series of performance tests for the integral Stirling cryocooler. Infrared sensor systems incorporating cryocoolers are required to be qualified to the appropriate environmental specification. Integral Stirling cryocooler for thermal imaging system have matured to the stage of undergoing formal qualification test program. The thermal environmental test of the Stirling cryocooler is presented in this paper. We performed that low and high temperature keeping test from -40°C to $+71^{\circ}\text{C}$ and operating test at high and low temperature cyclic range with acceptance tests performed at scheduled intervals. Cooldown time to 80K and steady state input power at 80K were determined as a function of cooler components temperatures at the compressor, hot end and cold tip. Tests performed on this cooler have been successful with a measured cooldown time to 80K of less than 5 minutes 24seconds for 71°C ambient temperature with input power of 11W

1. 서 론

적외선 검지기의 개발 추세를 보면 단소자 → 선형배열소자 → 초점면 배열(Focal Plane Array) 소자 등으로 발전되어 고성능, 고 응답성 열 영상 장비의 초소형화가 가능해지고 있다. 단소자와 선형배열소자의 경우에는 기계적으로 구동 mirror를 돌려서 영상을 얻지만, 이차원 배열 소자인 초점면 배열 소자는 구동 motor와 mirror가 필요 없는 IC chip 형태로 초소형이기 때문에 소자를 냉각하는 극저온 냉동기의 소형화도 같이 요구된다. 정밀 유도무기, 감시체계의 발전에 따

른 국내외 군수시장의 초점면배열소자 수요가 증대하고 있으며, 고집적 반도체 공정, 정보통신 및 의료 장비 등에서의 정밀온도 진단 및 제어에 따른 민수시장의 초점면배열소자 수요도 증대하고 있다.

개인화기 및 소형 열 영상 장비가 요구되는 무기 체계에 주로 사용되고 있는 비냉각형 열 영상 장비는 냉각형 열 영상 장비에 비해 감도(NETD, Noise- Equivalent Temperature Difference, 온도 분해능)와 응답속도가 떨어진다. 비냉각형 열 영상 장비도 열 감지 센서의 발열을 제거하는 최소한의 냉각 장치가 요구되기 때문에, 냉각형 열 영상 장비의 냉각기를 초소형화 한다면 비냉각형 열 영상 장비의 일부 대체도 가능하리라 예상된다. 위성탐재 센서, 항공기, 전투 차량 등의 전방 감시 적외선 장비, 사격 통제 장치에 사용되고 있는 적외선 센서는 고감도와 고분해능이 요구되기 때문에 냉각형 열 영상 장비가 필수적이다.

† 한국기계연구원 에너지기계연구센터

E-mail : sjpark@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7394 FAX : (042)868-7335

* 한국기계연구원 에너지기계연구센터

** 전주대학교 기계자동차공학과

초소형, 고성능, 고 응답성 열 영상 장비용 극저온 냉동기는 소형화, 경량화가 요구되기 때문에 열부하를 최소화하여야한다. 직접냉각방식은 간접냉각방식에 비해 20%이상의 열부하 저감이 가능하고, 일체형 극저온 냉동기는 분리형에 비해 연결관 등의 사용적(dead volume)을 최소화하므로 압축기의 성능 극대화가 가능하다.

선형압축기형 극저온 냉동기는 고신뢰성으로 인해 대용량(소비전력 40W-2kW)에서 많이 사용되나, 40W 이하의 이동 및 휴대용 소형 극저온 냉동기에서는 로타리 압축기형 극저온 냉동기를 주로 사용하고 있다. 선형압축기형은 진동, 소음 등의 문제로 인하여 dual acting 방식의 채택이 불가피하여, 소형의 경우 제작, 조립 등의 문제가 있을 뿐만 아니라 선형 모터의 효율이 낮아 소형화가 곤란하다. 로타리 압축기형 극저온 냉동기는 공진주파수로 운전되는 선형 압축기형에 비해 구동부 및 자기회로 어셈블리의 질량을 줄일 수 있으므로 전체 중량을 많이 감소시킬 수 있어 소형화가 가능하다.

또한 회전 압축기형 극저온 냉동기는 누설의 위험이 작아 탈부착 가능 구조를 채택할 수 있어 선형압축기형에 비해 유지, 보수가 편리하고, 비슷한 MTBF에도 불구하고 MTTF를 연장할 수 있다. 회전 압축기형은 선형압축기형에 비해 그 구조 및 설계기준, 부품의 제작 난이도등에서 현격한 차이가 있고, 소형화에 따른 열/구조 설계, 기구학적인 해석, 무운할 회전 모터, 제조 및 조립 공정 등의 연구개발이 필요하며, 10000시간의 MTTF를 실증하기 위한 환경, 수명, 신뢰성의 평가 및 검증이 필요하다.

초점면 배열 소자는 국내 차세대 열영상 소자로서 각광을 받을 것으로 예상된다. 향후 5년 이내 대량의 초점면 배열 소자의 국내 수요 발생이 예측되어 현 단계에서 외국 제조사로부터의 기술 횡포 및 종속을 탈피하기 위해 초점면 배열 소자 냉각용 극저온 냉동기의 국산화 개발이 절실히 필요하다.

이에 따라 한국기계연구원에서는 회전 일체형 스텔링 극저온 냉동기를 개발해 오고 있으며, 지금까지 설계, 제작, 조립된 스텔링 극저온 냉동기의 기술성능시험을 수행하고, 환경시험 및 수명 시험을 수행하는 단계에 이르렀다.

적외선 센서 냉각용 스텔링 극저온 냉동기의

성능은 주위 온도에 민감하게 영향을 받게 되며, 열 환경 성능 시험의 목적은 작동 온도 조건의 변화에 대한 열상장비용 스텔링 극저온 냉동기의 성능을 규정하는데 있다.

따라서 본 연구에서는 회전 압축기형 스텔링 극저온 냉동기의 신뢰성을 확보하기 위한 절차의 일환으로서, 다양한 환경 조건에서 작동할 수 있는가에 대한 평가를 위하여 열 환경 시험 평가를 수행하고 이에 대한 서술하고자 한다.

2. 일체형 스텔링 극저온 냉동기

2.1 일체형 스텔링 극저온 냉동기의 구조

일체형 스텔링 냉동기는 회전형 압축기(Rotary compressor), 팽창부, 가스연결라인 및 방열부로 구성되어 있다.

Fig. 1은 일체형 스텔링 냉동기의 기계구조 및 검출기 interface를 나타낸 그림이다. 일체형 스텔링 냉동기는 압축피스톤과 팽창기의 방향이 L자형으로 주로 배치되고, 회전형 압축기는 BLDC 구동모터, 회전운동을 직선 운동으로 변화하면서 압축 피스톤과 변위기(displacer)의 위상을 조절하기 위한 크랭크 기구 및 베어링, 압축 피스톤, 압축열을 주위로 방출하기 위한 방열부로 구성되어 있다. 압축기와 팽창기를 연결하기 위한 연결라인은 분리형 스텔링 냉동기와는 달리 최소화되며, 압축열이 팽창부에 전달되지 않도록 충분한 방열 구조를 가져야 한다. 팽창부는 변위기 및 열교환기인 재생기(Regenerator)로 구성되어 있다. 이때 변위기의 운동 및 위상은 크랭크 기구에 의해 제어되고, 압축기와 동일한 구동주파수로 동작한다.

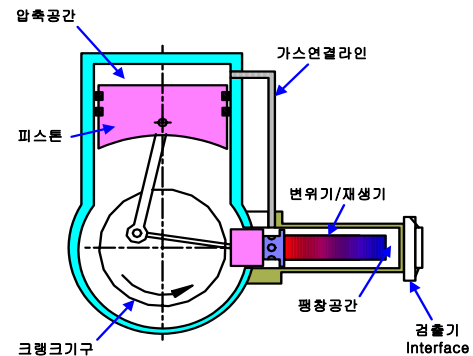


Fig. 1 Schematic diagram of the integral Stirling cryocooler

2.2 기초 설계

SAGE 프로그램 해석을 통해 목표로 하는 열상장비용 스텔링 극저온 냉동기를 설계하였다.

Table 1은 성능해석 결과를 고려하여 선정된 회전일체형 스텔링 극저온냉동기의 설계사양이다.

Fig. 2는 기초해석과 기본 설계안을 따라 형상 설계한 스텔링 극저온 냉동기를 보여주고 있다. 최소의 충전압력으로 0.5W급의 냉동능력을 제공할 수 있는 회전일체형 스텔링 극저온냉동기의 사양을 설계기준으로 하였다.

Table 1. Specifications of the Stirling cryocooler

Items		Specifications
Compressor	Cylinder diameter	14 mm
	Stroke	3 mm
	Dead space height	0.5 mm
	Clearance	10 μm
Expander	Diameter	8.0 / 7.7 mm
	Dead space height	0.5 mm
	Clearance	10 μm
Displacer/ Regenerator	Diameter	7.4 / 7.1 mm
	Stroke	4 mm
	Phase angle	90 deg. advance
	Length of packed mesh	45 mm
	Number of mesh	#250(SUS304)
	Porosity	0.6908
Charging pressure		> 2.1 MPa
Operating frequency+		30 ~ 60 Hz

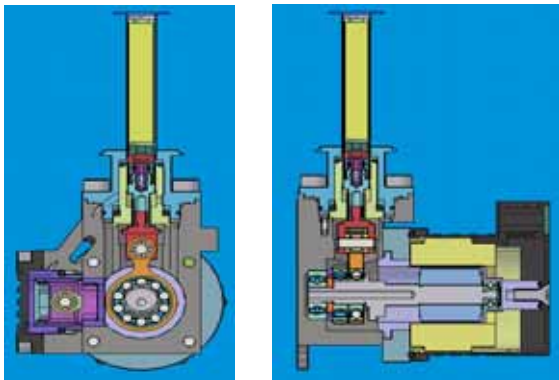


Fig. 2. Design drawings of the integral Stirling cryocooler

3. 열 환경 성능시험

3.1 열 환경 성능시험 기준

열 환경성능시험의 절차는 먼저 스텔링 극저온

냉동기를 환경챔버에 넣고 시험하고자 하는 온도를 설정한 뒤, 스텔링 극저온 냉동기가 안정된 후에 성능측정을 수행한다. 상온(23℃)에서의 기술성능시험과 함께 고온(+71℃) 및 저온(-40℃) 온도 기준에서의 성능시험을 수행한다. 기술시험 및 열환경 성능시험시에 사용되는 simulation Dewar는 미리 열부하를 측정하여 기준으로 삼는다. 측정 항목은 80K까지의 냉각 시간, 최저도달 온도, 80K로 안전될 때의 정상상태입력, 최대 냉각입력 및 누설율 등이다.

Table 2는 열상장비용 회전 압축기형 스텔링 극저온 냉동기의 열환경 성능시험기준을 보여주고 있다.

Table 2. Thermal environmental performance test criterias of the Stirling cryocooler

Ambient temperature	-40℃	+23℃	+71℃
Cool-down time to 80K	6 minutes Max.	6 minutes Max.	10 minutes Max.
Coldtip temperature	80K Max.	80K Max.	80K Max.
Steady state input power @ 80K	16W Max.	16W Max.	16W Max.
Peak power consumption	16W Max.	16W Max.	16W Max.
Helium leak rate	8×10^{-8} Torr · l/sec.		

※ Simulation dewar heat load : 54sccm(N₂)

3.2 Simulation dewar heat load

적외선 검출기용 Simulation dewar(실험용 극저온 용기)의 자체부하를 측정하기 위하여 용기 내 저온부 끝단 부분에 액체 질소를 주입하고 열부하를 가하여 이때 증발되는 액체질소의 증발량을 측정하는 실험을 수행 하였다. 저온부 끝단 부분의 온도가 정상상태에 도달하는 것을 알아보기 위해서 온도센서를 인듐을 사용하여 저온부 끝단 부분에 부착하였다.

Fig. 3은 Simulation dewar내 무부하시와 열부하(0.1, 0.2, 0.3 W)를 가했을 때의 증발률 실험 중 시간에 따른 온도강하와 증발되는 액체질소 유량을 나타낸 것이다. 처음 액체질소 주입 시 저온부 끝단 부분의 온도는 급격하게 떨어져 약 80 K 근처에서 정상상태를 보인다. 정상상태에서 유량계와 연결을 하여 액체질소의 증발량을 측정하

였다. 액체질소 boil-off 후 저온부 끝단 부분의 온도는 다시 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다.

Boil-off 되어 급격히 유량이 감소되는 지점의 질량유량을 이용하여 열부하와 질량유량의 관계 그래프를 그리면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. Simulation dewar에서 무부하시 증발되는 질소량은 54 sccm이고, heat load는 약 237.1 mW이었다.

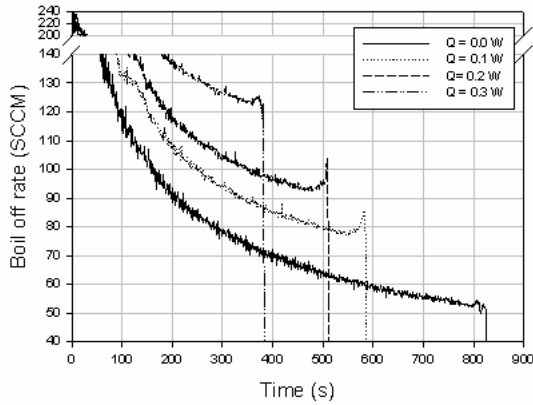


Fig. 3. Transient variation of mass flow rate for various thermal loads

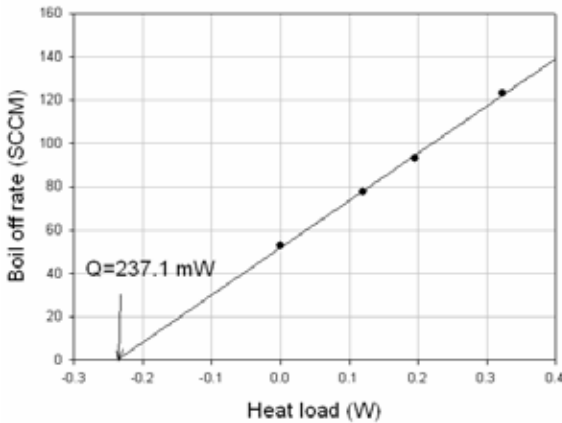


Fig. 4. Effect of thermal load on the boil-off

3.3 열 환경 성능시험결과 및 고찰

Fig. 5는 환경시험챔버내의 온도를 -40°C , $+23^{\circ}\text{C}$, $+71^{\circ}\text{C}$ 로 변화하면서 회전 압축기형 스텔링 극저온 냉동기의 냉각특성을 나타낸 그림이다. 환경시험챔버내의 온도가 -40°C , $+23^{\circ}\text{C}$ 와 $+71^{\circ}\text{C}$ 일 때의 80K 도달 시간은 2분 40초, 4분 23초와 6분 39초로 나타났으며, 최저도달온도는 각각 45.3K, 58.1K과 68.7K이었다. 이와 같은 결과는 Tabl2 2에서의 열환경 성능시험기준을 만족하는 결과이다.

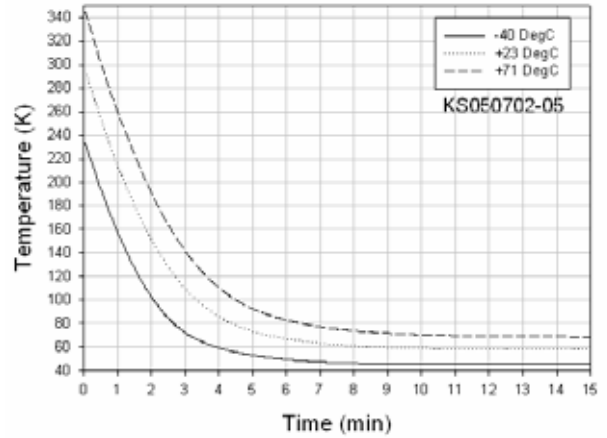


Fig. 5. Cool-down characteristics with the various ambient temperatures

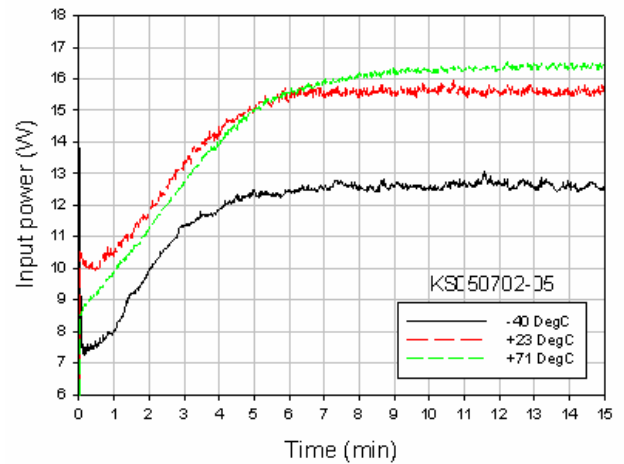


Fig. 6. Input power with the various ambient temperatures

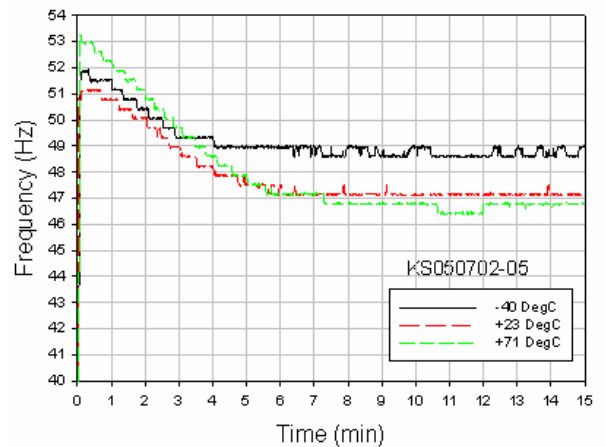


Fig. 7. Operating frequency with the various ambient temperatures

Fig. 6은 Fig. 5의 실험에서 입력된 입력을 보여 주고 있으며, Fig. 7은 작동주파수의 변화를 보여 주고 있다. 환경시험챔버내의 온도가 -40℃, +23℃와 +71℃ 일 때 저온부 온도 80K 일 때의 입력은 각각 10.76W, 15.02W와 15.29W 이었다. 이 값은 저온부 온도를 80K로 제어하지 않고 최대 입력으로 작동하고 있기 때문에 저온부가 80K에 도달하는 최대입력소모량으로 볼 수 있다. 또한 Fig. 7을 통해서 알 수 있는 바와 같이 환경시험 챔버내의 온도가 -40℃, +23℃와 +71℃ 일 때 작동주파수가 각각 52Hz, 51Hz와 53Hz로 시작하여 온도가 내려가면 점점 감소하다가 약 80K 이하로 내려가면서 각각 49Hz, 47Hz와 46.7Hz로 안정이 되는 것을 알 수 있다. 이는 저온부의 온도가 내려감에 따라 모터의 부하가 커져서 작동주파수가 감소하는 것으로 판단된다.

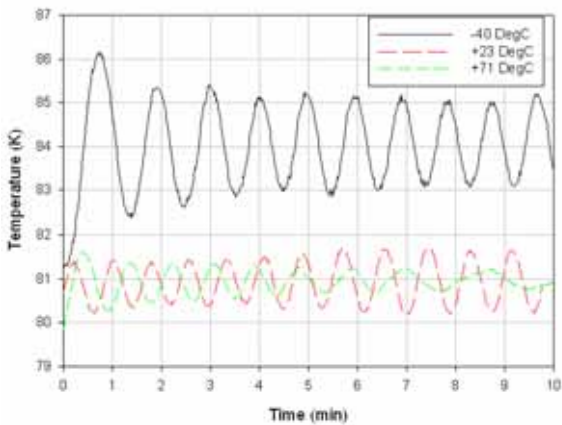


Fig. 8. Temperature variations of the cold finger with the various ambient temperatures

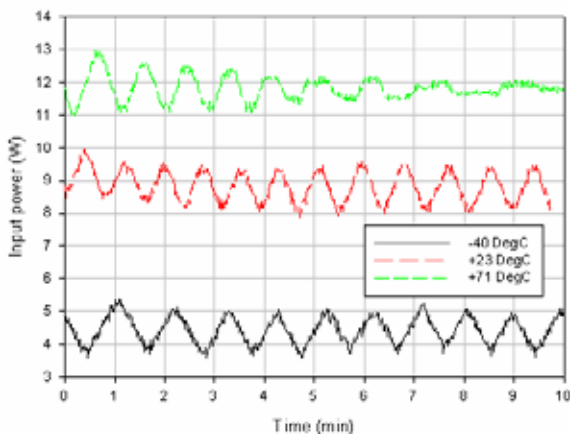


Fig. 9. Input power variations of the cold finger with the various ambient temperatures

Fig. 8은 환경시험챔버내의 온도가 -40℃, +23℃와 +71℃ 일 때 회전 압축기형 스테링 극저온 냉동기의 저온부 온도(80K)가 일정하게 유지되도록 저온부의 온도를 감지하여 BLDC 모터의 입력을 제어하였을 때의 온도변화를 보여주고 있다. 환경시험챔버내의 온도가 +23℃와 +71℃에서는 저온부의 온도가 약 81K 근방에서 온도편차가 약 1.0K 정도로 안정되는 것을 볼 수 있으며 환경시험챔버내의 온도가 -40℃의 경우는 저온부의 온도가 약 84K 근방에서 온도편차가 약 2.0K 정도로 안정되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 실험에서 환경시험챔버내의 온도가 -40℃, +23℃와 +71℃ 일 때 회전 압축기형 스테링 극저온 냉동기의 저온부 온도(80K)가 일정하게 유지되도록 저온부의 온도를 감지하여 BLDC 모터의 입력을 제어하였을 때의 입력변화를 보여주고 있다. 환경시험챔버내의 온도가 -40℃, +23℃와 +71℃ 일 때 정상상태 입력은 각각 4.42W, 8.83W와 11.81W 이었으나, -40℃와 +23℃일 때 입력의 편차가 약 1W 가량 있는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 9를 통해서 열환경시험 기준에 포함되지 않지만 온도편차를 좀 더 줄이기 위해 BLDC 모터의 제어 로직을 개선해야만 한다는 것을 알 수 있었다.

Table 3은 이상과 같은 열환경 성능시험결과를 정리하여 나타낸 표를 보여주고 있다.

Table 3. Thermal environmental performance test results of the Stirling cryocooler

Ambient temperature	-40℃	+23℃	+71℃
Cool-down time to 80K	2min. 40sec.	4min. 23sec.	6min. 39sec.
Coldtip temperature	45.3 K	58.1 K	68.7 K
Steady state input power @ 80K	4.42 W	8.83 W	11.81 W
Peak power consumption	10.76 W	15.02 W	15.29 W
Helium leak rate	2.4×10^{-8} Torr · l/sec.		

※ Simulation dewar heat load : 54sccm(N₂)

4. 결 론

이상과 같이 회전 압축기형 스테링 극저온 냉동기의 신뢰성을 확보하기 위한 절차의 일환으로서, 다양한 환경 조건에서 작동할 수 있는가에 대한 평가를 위하여 열 환경 시험 평가를 수행한 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) 적외선 검출기용 Simulation dewar(실험용 극저온 용기)의 자체부하를 측정한 결과 Simulation dewar에서 무부하시 증발되는 질소량은 54 sccm이고, heat load는 약 237.1 mW이었다.

(2) 환경시험챔버내의 온도가 -40°C , $+23^{\circ}\text{C}$ 와 $+71^{\circ}\text{C}$ 일 때의 80K 도달 시간은 2분 40초, 4분 23초와 6분 39초로 나타났으며, 최저도달온도는 각각 45.3K, 58.1K과 68.7K이었다.

(3) 환경시험챔버내의 온도가 -40°C , $+23^{\circ}\text{C}$ 와 $+71^{\circ}\text{C}$ 일 때 저온부 온도 80K 일 때의 최대피크 입력은 각각 10.76W, 15.02W와 15.29W 이었다.

(4) 환경시험챔버내의 온도가 -40°C , $+23^{\circ}\text{C}$ 와 $+71^{\circ}\text{C}$ 일 때 작동주파수가 각각 52Hz, 51Hz와 53Hz로 시작하여 온도가 내려가면 점점 감소하다가 약 80K 이하로 내려가면서 각각 49Hz, 47Hz와 46.7Hz로 안정이 되는 것을 알 수 있다. 이는 저온부의 온도가 내려감에 따라 모터의 부하가 커져서 작동주파수가 감소하는 것으로 판단된다.

(5) 환경시험챔버내의 온도가 $+23^{\circ}\text{C}$ 와 $+71^{\circ}\text{C}$ 에서는 저온부의 온도가 약 81K 근방에서 온도편차가 약 1.0K 정도로 안정되는 것을 볼 수 있으며 환경시험챔버내의 온도가 -40°C 의 경우는 저온부의 온도가 약 84K 근방에서 온도편차가 약 2.0K 정도로 안정되는 것을 볼 수 있다.

(6) 환경시험챔버내의 온도가 -40°C , $+23^{\circ}\text{C}$ 와 $+71^{\circ}\text{C}$ 일 때 정상상태 입력은 각각 4.42W, 8.83W와 11.81W 이었으나, -40°C 와 $+23^{\circ}\text{C}$ 일 때 입력의 편차가 약 1W 가량 있는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2003년도 민군겸용기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Israel Urieli, David M. Berchowitz, 1984, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd..
- (2) Walker, G. And Bingham, E.R., 1994, "Low Capacity Cryogenic Refrigeration", Oxford University Press, Oxford.
- (3) 홍용주 외, 2001, "스터링 냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54.
- (4) 박성제 외, 2006, "일체형 스테링 냉동기의 설계, 제작 및 성능특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 8권 1호, pp. 54-58.
- (5) Maxtech International Inc., 1997, "The World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems", Maxtech International Inc.
- (6) R. A. Ackermann, 1997, "Cryogenic Regenerative Heat Exchangers", Plenum Press.
- (7) G. Walker, 1983, "Cryocoolers Part 2: Applications", Plenum Press.
- (8) H. J. M. Ter Brake, 2002, "State-of-the-art review on low-power cryocoolers", Proceedings of the 19th ICEC, pp. 307 - 314.
- (9) G. Walker, 1989, "Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, Oxford.
- (10) Yoav Zur, 2003, "Rotary Cooler Status", M-CALC IV, San Diego, CA.
- (11) G. R. Pruitt, T. M. Davis and B. A. Ross, 2003, "Methods for Accelerated Life Evaluation of Long-Life Cryocoolers", Preprint of CEC/ICMC
- (12) C.S.Naiman, 1990, "Performance Test Results on a Miniature Stirling Cryocooler for use in Integrated Dewar Detector Assemblies", Advances in Cryogenic Engineering, Vol.35, pp.1391 - 1399.