

일체형 스테링 냉동기의 설계, 제작 및 성능특성에 관한 연구

A study on the performance characteristics of rotary type Stirling cryocooler

박성제*, 홍용주*, 김효봉*, 김양훈**

S. J. Park*, Y. J. Hong*, H. B. Kim*, Y. H. Kim**

Abstract: Stirling cryocooler is relatively compact, reliable, commercially available, and uses helium as a working fluid. Over the past decade and a half, there has been rapid development of Stirling cryocooler, mainly for military and space applications. Stirling cryocoolers have been widely used for the cooling of infrared sensors and high temperature superconducting filters to the temperature of the liquid nitrogen. The Stirling cryocooler with the rotary compressor is applicable to the cooling device for the compact mobile thermal imaging system, because the cryocoolers have the compact structure and light weight. In this paper, integral Stirling cryocooler is designed, manufactured and fabricated, and performance characteristics are investigated. This cooler delivers approximately 0.6W cooling at 80K for 20W of input power from 24V DC power supply.

Key Words: Stirling cryocooler, Rotary type, Regenerator, Displacer, Piston, Performance characteristics, No load temperature.

1. 서 론

초점면배열 적외선 검출기를 극저온의 온도로 냉각할 수 있는 냉동기로는 열전(Peltier) 냉동기, 줄-톰슨(Joule-Thomson) 극저온냉동기, 맥동관(Pulse Tube) 극저온냉동기, 회전 또는 선형 방식의 스테링 극저온냉동기 등이 있으며, 각기 다른 적외선 검출소자의 냉각 요구온도에 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 일체형 스테링 극저온냉동기(rotary integral Stirling cryocooler)가 채용되고 있다 [1-2].

적외선 센서 냉각에 사용되는 스테링 극저온 냉동기의 종류는 크게 분리형(split type)과 일체형(integral type) 등의 2가지로 분류될 수 있다. 일체형은 압축기

와 팽창기가 같은 크랭크에 연결되고, 분리형은 압축기와 팽창기가 연결관(split tube)을 통해 연결되며 주로 자유 피스톤(free piston) 형태를 취한다[3].

이동 및 기동성을 요구하지 않는 적외선 열영상 시스템에서는 주로 분리형 스테링 극저온 냉동기를 주로 사용하였는데, 분리형 스테링 냉동기를 사용했던 주요한 이유는 압축기와 팽창기가 같은 크랭크에 의해 작동되는 일체형에서 압축기를 통한 미세 진동이 적외선 센서가 부착되어 있는 팽창기의 저온부(cold head)에 영향을 주기 때문에 이를 최소화하기 위한 것이다. 그러한 진동은 요구하는 적외선 영상의 해상도에 지대한 악영향을 미친다. 그러나 연결관은 사용적(dead volume)을 증가시켜 효율을 낮추며, 적절한 선형 댐핑 기구에 따른 압축기의 위상을 적절히 맞추어야 하는 정밀성을 요구하며, 이 또한 새로운 진동을 유발하기도 한다[4].

분리형 스테링 냉동기에서는 팽창기의 변위기(displacer)는 가스동력학적으로 작동되기 때문에 변위기가 팽창기의 저온부에 충돌하지 않는다는 보장은 없으며, 충분히 여유를 주기 위해서는 팽창공간에 사용적이 증대할 수밖에 없다. 반면에 일체형 스테링 냉동기를 사용한다면 팽창기의 변위기는 크랭크에 의해 일정한 변위를 가질 것이며, 적외선 센서가 장착된 저온부에 충돌할 가능성은 없다. 또한 무엇보다도 일체형 스테링 극저온 냉동기는 분리형에 비해 소형화가 가능하여 이동 및 기동성을 요구하는 응용분야에 널리 이용이 가능하다[5].

따라서 본 연구에서는 소형이고, 신뢰성 높은 초점면 배열형 적외선 센서 냉각용 일체형 스테링 냉동기를 설계, 제작하고, 성능을 향상 시키고자 성능 실험을 통하여 성능특성을 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 일체형 스테링 냉동기

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

Fig. 1은 일체형 스테링 냉동기의 기계구조 및 검출기 연결부(interface)를 나타낸 그림이다. 일체형 스테링 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 스테링 냉동기와는 달리 최소

* 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

** 학생회원 : 부산대학교 대학원 기계공학과

원고접수 : 2005년 9월 16일

심사완료 : 2006년 1월 16일

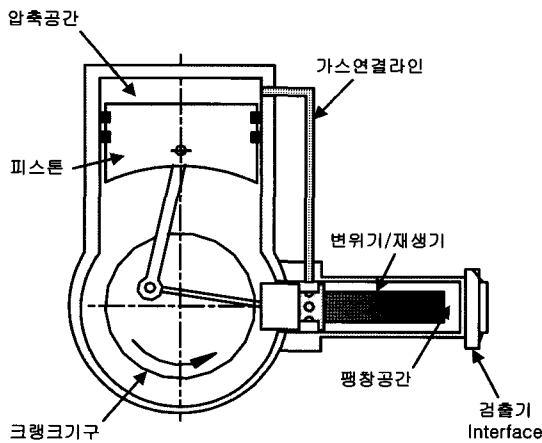


Fig. 1. Schematic diagram of the Stirling cryocooler.

화되며, 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.

2.2 설계 및 제작

Fig. 2는 SAGE 프로그램[6-8] 해석을 통해 구한 압축공간 및 팽창공간의 압력을 나타낸 그림이다. 이때 해석조건은 운전주파수는 40 Hz, 충전압력 21bar이다. 팽창공간에서 압력 손실이 발생하며 그 크기는 그다지 크지 않으나 이로 인해 팽창공간에서 팽창일 감소가 발생함을 알 수 있다.

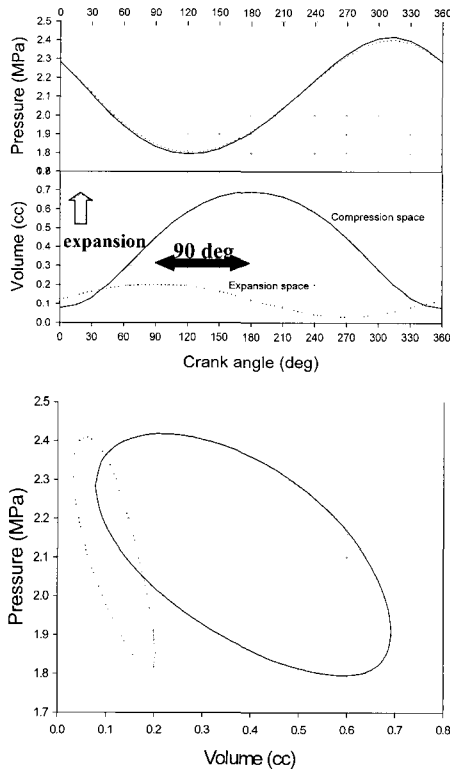


Fig. 2. P-V diagram in the compression and expansion space.

Fig. 3은 설계사양 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 충전압력의 변화에 따른 가용 운전주파수 영역을 나타내며, Table 1은 성능해석 결과를 고려하여 선정된 회전일체형 스테링 극저온냉동기의 설계사양이다.

냉각기를 설계, 제작함에 있어서 성능 및 내구성에 영향을 미치는 몇 가지 요인의 부품이 있다. 이러한 냉각기의 성능 및 내구성에 영향을 미칠 수 있는 제품의 인자는 먼저 실린더와 피스톤 사이의 Seal의 이상으로 인한 압축력 저하로 발생하는 성능저하 및 수명단축과 냉동기 내부의 가스누설에 의한 수명단축, 그리고 제작과정에서의 수분유입과 가스 오염에 의한 성능저하 등으로 크게 나눌 수 있다. 이상과 같은 요인에 대한 해결 방안을 정리해 보면[9-10]

- 압축기, 팽창기 간극 최소화, 금속 간극 Seal 적용
 - 피스톤 세라믹 코팅 기술
 - 분리형 BLDC 모터 채용
 - BLDC 모터 효율 개선
 - 압축기 피스톤 및 변위기 유연링크 채용
 - 금속재질 헬륨 누설 방지기구 도입
 - 재생기 효율개선
- 과 같다.

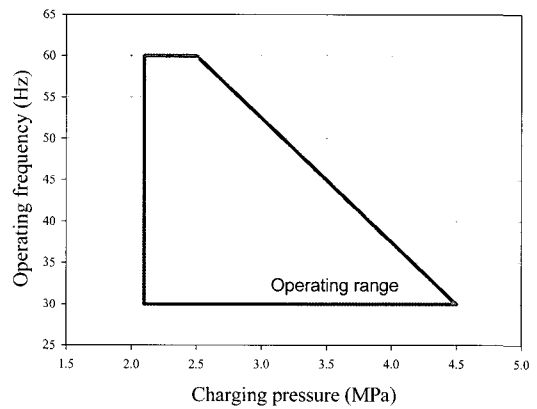


Fig. 3. Design operating region of the integral Stirling cryocooler.

Table 1. Specifications of the Stirling cryocooler.

Items		Specifications
Compressor	Cylinder diameter	14 mm
	Stroke	3 mm
	Dead space height	0.5 mm
Expander	Clearance	10 μm
	Diameter	8.0 / 7.7 mm
	Dead space height	0.5 mm
Displacer/Regenerator	Clearance	10 μm
	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. 4는 이상과 같은 기초해석과 기본설계안을 따라 형상 설계한 스테어링 극저온 냉동기를 보여주고 있다. 최소의 충전압력으로 0.5W급의 냉동능력을 제공할 수 있는 회전일체형 스테어링 극저온냉동기의 사양을 설계 기준으로 하였다.

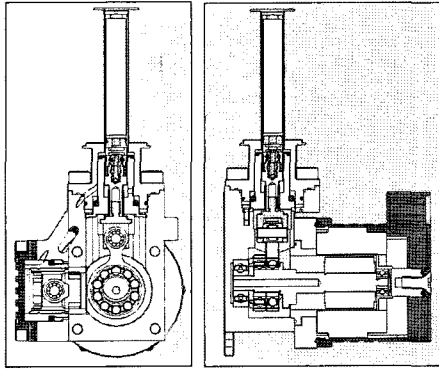


Fig. 4. Design drawings of the integral Stirling cryocooler.

2.3 성능실험장치

일체형 스테어링 냉동기의 운전특성을 구하기 위해 Fig. 5와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험에 사용된 압축기는 0.5 W급(냉각온도 80 K) 냉동능력의 스테어링 냉동기용으로 설계, 제작된 BLDC 모터를 이용한 로타리형 압축기(피스톤 직경 14.0 mm)로, 내부에는 90°의 위상차를 가지고 왕복운동을 하고, 팽창기(직경 7.1 mm)와 짧은 연결관으로 연결되어 있으며 로타리형 압축기의 운전주파수와 정현파 입력전류, 전압의 공급 및 측정이 가능하도록 구성하였다. 스테어링 냉동기 저온부의 온도는 silicon-diode 센서를 부착하여 측정하였고, 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 9.5Ω의 망가닌 열선을 저온부에 감고 전류를 흘려 일정한 온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다[11]. 그리고 압축기 출구의 압력을 측정하기 위하여 PCB사의 piezo type dynamic 압력 센서를 사용하였다.

스테어링 냉동기 팽창기의 저온부(cold end)는 상온의 주위로부터 열침투를 차단하기 위해 진공용기(dewar) 내에 설치하였으며, 실험에 사용된 진공용기는 스테인레스강으로 제작하였다.

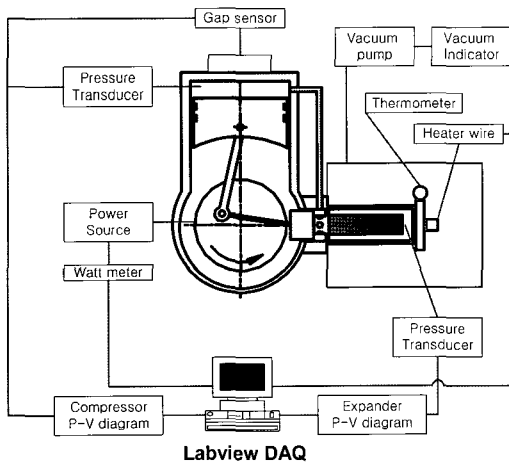


Fig. 5. Experimental apparatus of the Stirling cryocooler.

2.4 성능실험결과

Fig. 6은 일체형 스테어링 냉동기 시작품에 압력 25bar로 충전하고, 24V DC를 공급했을 때, 스테어링 냉동기 driver에서 측정되는 압력, 전류와 모터 hall 센서의 출력신호를 보여주고 있다. 스테어링 냉동기 저온부 온도가 100K 일 때 측정된 압력진폭은 약 3.5bar로서 압력비가 약 1.33이었다. Hall 센서는 모터 driver에 80도 간격으로 3개 부착되어 있으며, 각각의 hall 센서 전압신호는 마그네트의 회전에 의한 자력변화에 의하여 발생하며 마그네트의 극성이 6극이므로 Rotor 1회전(360°) 할 경우 hall 센서 신호가 120° 간격으로 3회 발생한다. 전류 신호에서 2개의 불규칙한 사이클이 회전모터가 1회전 한 것을 의미하며, 작동주파수는 초기에 약 48Hz로 시작하여 온도가 내려감에 따라 약 35Hz까지 내려간다. 그림에서 100K 일 때에는 작동주파수가 약 42Hz이었다.

그리고 1 사이클에서 전류의 피크 값이 2번 발생하는 것은 피스톤의 상하 운동에 따라 각각 1번씩의 피크 값을 보인다는 것을 예측할 수 있으며, 시작품에서는 전류의 피크값이 노이즈를 제거하면 약 0.7A와 0.9A로 약간 차이가 나는 결과를 통해 피스톤의 상하 운동에서 마찰력이 차이가 난다는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 hall 센서의 전압신호의 주기가 전류의 피크 값이 높은 영역에서 길어지는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상을 통해 시작품에서 설계, 제작 및 조립시 피스톤 실린더, 변위기 실린더와 회전축 사이의 동심도 뿐만 아니라 진원도에도 문제점이 있는 것으로 판단된다.

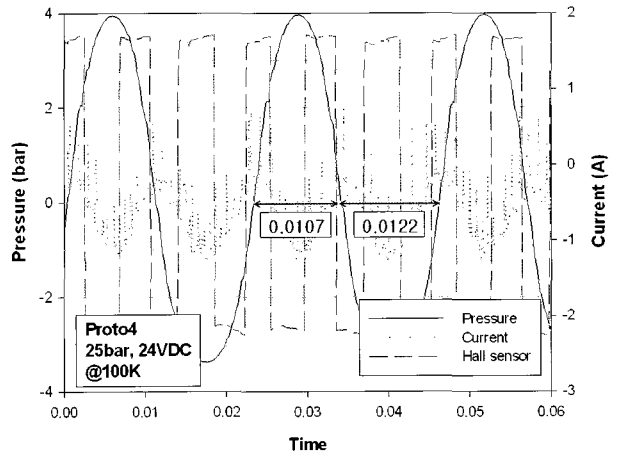


Fig. 6. Voltage, current and hall sensor output in the 24V DC input.

Fig. 7은 충전압력 25bar 일 때, 공급전압에 따른 시작품의 냉각특성을 보여주고 있다. 공급전압이 증가함에 따라 냉각속도가 점점 증가하며, 최저도달온도는 점점 낮아졌고, 24V DC 공급시 80K에 도달하는 시간은 약 2분 40초이었다.

Fig. 8은 저온부 온도와 공급전압에 따른 입력 전력의 변화를 보여주고 있는데, 저온부의 온도가 내려감에 따라 입력전력이 증가하는 경향을 보였으며, 공급전압이 증가함에 따라 입력전력이 증가하는 경향을 보였다. 즉 스테어링 냉동기에 24V DC를 공급할 때 300K에서는 입력전력이 약 12W이었지만, 저온부의 온도가 내려감에 따라 입력전력이 점점 증가하여 저온부 온도가 80K

일 때에는 입력전력이 약 20W 이었다. 그리고 공급전압 20V DC 일 때의 입력전력이 22V DC일 때 보다 부분적으로 높은 값이 나온 것은 냉동기 내부의 피스톤과 실린더, 그리고 변위기와 실린더 사이의 마찰이 일시적으로 증가하여 부하변동에 의한 것이며, 그 외의 실험 결과는 일정한 경향을 보이므로 전체 경향을 파악하는 데는 문제가 없었다.

Fig. 9는 공급전압에 따른 냉동능력의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 10은 충전압력에 따른 냉동능력의 변화를 보여주고 있다. 냉동능력은 온도가 증가함에 따라 증가하며 선형적인 변화를 보여주고 있다. 또한 공급전압과 충전압력이 높을수록 최저도달온도가 낮아지며, 냉동능력이 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구에 의해 설계, 제작된 일체형 스테링 극저온 냉동기의 성능은 충전압력 25bar일 때, 24V DC 공급전압에 대해 입력은 약 21W이고 최저도달온도는 52K 이었으며, 냉동능력은 저온부 온도 80K에서 약 0.6W이었다. 그리고 무게는 약 472g 으로 휴대 및 기동형 열영상 장비에 적용할 수 있는 기준을 만족하는 것을 알 수 있었다.

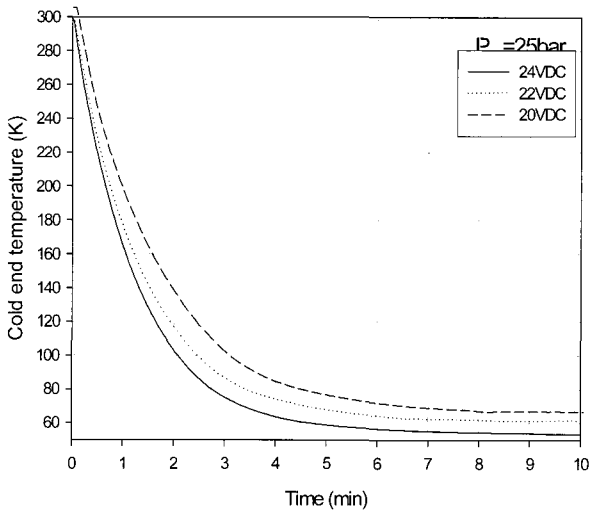


Fig. 7. Cooldown characteristics with the supplied voltage.

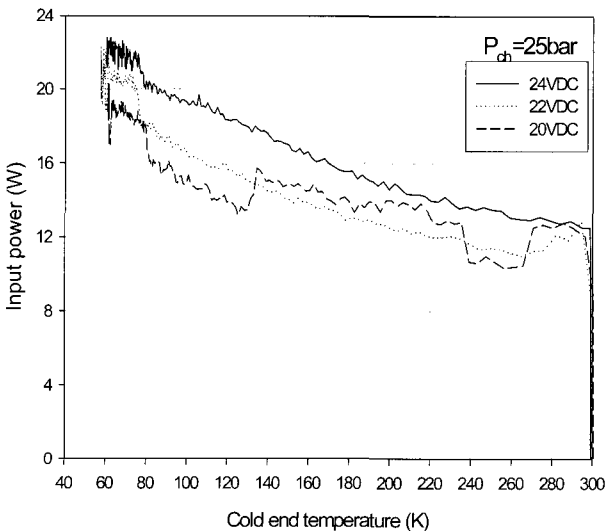


Fig. 8. Input power with the supplied voltage.

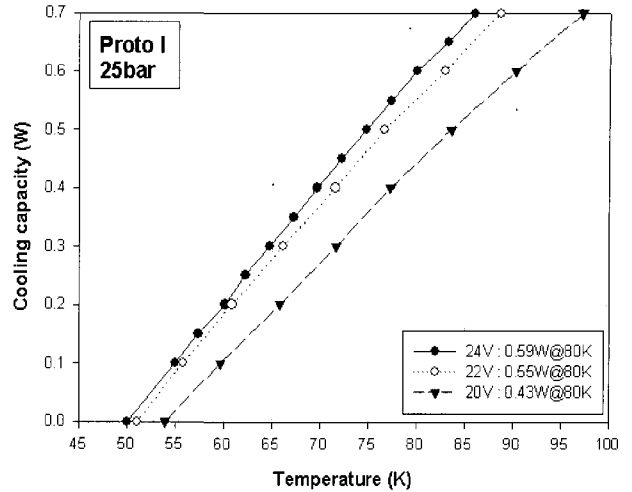


Fig. 9. Cooling capacity with the supplied voltage.

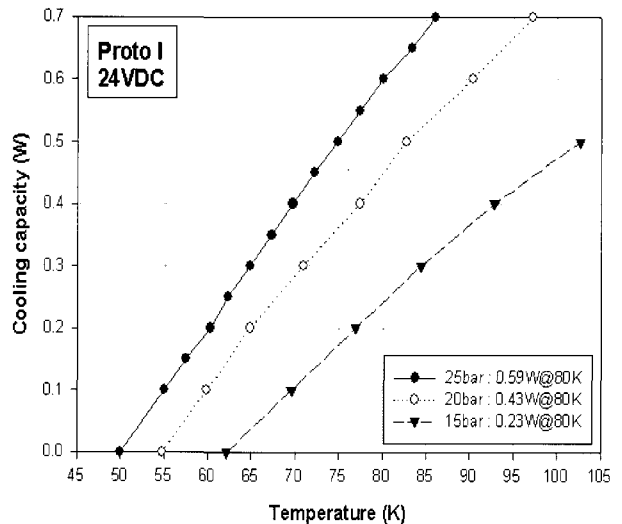


Fig. 10. Cooling capacity with the charging pressure.

3. 결 론

본 연구에서는 소형이고, 신뢰성 높은 초점면 배열형 적외선 센서 냉각용 일체형 스테링 냉동기를 설계, 제작하여 성능 향상을 위해 성능특성에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- [1] 스테링 냉동기 시작품에 압력 25bar로 충전하고, 24V DC를 공급했을 때, 저온부 온도가 100K 일 때 측정된 압력진폭은 약 3.5bar로서 압력비가 약 1.33이었다.
- [2] 스테링 냉동기의 작동주파수는 초기(300K)에 약 48Hz로 시작하여 온도가 52K까지 내려감에 따라 약 35Hz 까지 내려간다.
- [3] 1 사이클 내에 전류 피크 값의 차이가 있다는 것을 알 수 있었으며, 이것은 냉동기 작동 성능을 저하 시키는 원인이 되고 있어 개선이 필요하다.
- [4] 저온부의 온도가 내려가고 공급전압이 증가함에 따라 입력전력은 증가하며, 공급전압이 증가하는 경

향을 보였다.

- [5] 공급전압이 높을수록, 충전압력이 높을수록 냉동능력이 증가하는 것을 알 수 있다.
- [6] 설계, 제작된 일체형 스테어링 극저온 냉동기의 성능은 충전압력 25bar일 때, 24V DC 공급전압에 대해 입력은 약 20W이고 최저도달온도는 52K 이었으며, 냉동능력은 저온부 온도 80K에서 약 0.6W 이었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 민군겸용기술개발사업지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Maxtech International Inc., "The World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems", Maxtech International Inc., 2001.
- [2] 박성제, 고득용, "적외선 소자 냉각용 극저온 냉동장치", 한국기계연구원 기계와 재료, Vol.10, No.2, p.92, 1998.
- [3] G. Walker, Cryocoolers Part 2: Applications, Plenum Press, 1983.
- [4] G. Walker, "Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", Clarendon Press, Oxford, 1989.
- [5] H. J. M. Ter Brake, State-of-the-art review on low-power cryocoolers, Proceedings of the 19th ICEC, pp. 307 - 314, 2002.
- [6] Israel Urieli, David M. Berchowitz, "Stirling Cycle Engine Analysis", Adam Hilger Ltd., 1984.
- [7] Walker, G. And Bingham, E.R., Low Capacity Cryogenic Refrigeration, Oxford University Press, Oxford, 1994.
- [8] 홍용주, 외, "스테어링냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001.

- [9] Uri Bin-nun, Pat Frisoli, Long Life Low Cost Coolers, M-CALC IV, San Diego, CA, 2003.
- [10] Yoav Zur, Rotary Cooler Status, M-CALC IV, San Diego, CA, 2003
- [11] 박성제, 홍용주, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, 이기백, "충전압력 및 작동주파수 특성 연구에 의한 스테어링 냉동기 개발", 한국초전도·저온공학회 논문지, 3권 2호, pp. 62-68, 2001.

저자 소개



박성제(朴聖濟)

1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 책임연구원.



홍용주(洪溶柱)

1968년 03월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원.



김효봉(金孝烽)

1960년 04월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 충남대 공대 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 선임기술원.



김양훈(金良勳)

1972년 04월 27일생, 1998년 제주대 공대 기계공학과 졸업, 2001년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 부산대 공대 기계공학과(박사과정).