

<응용기술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2015.3.4.241>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집섹션: 한국기계연구원 주요사업 창의과제】

적외선 검출기용 맥동관 극저온 냉동기 기술개발

염한길^{*†} · 박성제^{*} · 홍용주^{*} · 고준석^{*} · 인세환^{*} · 김효봉^{*}

* 한국기계연구원 극한기계연구본부

Development of the Pulse Tube Cryocooler for Infrared Detector

Hankil Yeom^{*†}, Seoung-Je Park^{*}, Hong-Ju Hong^{*}, Junseok Ko^{*}, Sehwan In and Hyo-Bong Kim^{*}

* Extreme Mechanical Engineering Division, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received January 27, 2015 ; Revised September 11, 2015 ; Accepted September 11, 2015)

Key Words: Cryocooler(극저온 냉동기), Pulse Tube(맥동관), Inertance Tube(관성관), Linear Compressor(선형압축기), Moving Magnet(이동 자석형), Infrared Detector(적외선 검출기)

초록: 국내 사용되고 있는 적외선 검출기 냉각용 스텔링 극저온 냉동기는 상당부분 수입에 의존하고 있으며, 높은 대당 가격, 제한적인 수명 및 내구성 부족으로 지속적인 극저온 냉동기 수요가 발생하고 있다. 그런데 적외선 검출기용 극저온 냉동기 기술은 국방, 우주관련 기술로 선진국의 기술이전이나 공동개발이 매우 제한적이다. 본 연구를 통해 개발하고자 하는 맥동관 극저온 냉동기는 저온구동부의 기계적 피스톤을 가스피스톤으로 대체하고, 압축방식을 선형압축방식으로 바꿈으로써 낮은 진동, 높은 수명 및 내구성을 확보할 수 있다. 이를 통해 맥동관 냉동기의 기술수준을 선진국에 근접시키고, 독자적인 냉각형 적외선 검출기 설계 및 제작기술에 대한 기술을 확보하고자 한다.

Abstract: Most of the Stirling cryocoolers used for infrared detector cooling in domestic is imported. Because the cooler has a high price, short life and poor durability, demand for the coolers continues steadily. However, the cooler is highly related to defense and space technology, technology transfer or co-development with the countries having expertise in cooler design is very limited. The pulse tube cooler to be developed in this study is such that the mechanical piston in low temperature actuating part is replaced by the gas piston and linear compressor is adopted, which results in low vibration, long life and better durability. It is expected that development of the pulse tube cooler will not only improve our technology to the level of advanced countries, but also enhance the skills in designing and manufacturing of the infrared detector.

1. 서론

적외선검출기 냉각용으로 많이 사용되고 있는 스텔링 극저온 냉동기는 극저온의 온도 영역에서 구동하는 압축 및 팽창 피스톤으로 인해 기계적인 진동의 발생 및 운용 신뢰성이 제한되는 단점이 있으나, 에너지 효율이 높고 소형 경량화가 가능한 장점으로 인해 다양한 군사 분야 및 산업분야에서 활용되고 있다.⁽¹⁾ 최근 적외선검출기의 고 사양에 따른 고성능 극저온 냉동기의 필요성이 점차 증대되고 있다.

위성탑재 센서, 항공기, 전투차량 등의 전방 감시 적외선 장비, 사격통제 장치, 정밀 온도진단 등에 사용되는 초점면 배열 방식 적외선 검출기의 신호 대 잡음비 개선을 위해 액체질소온도 수준의 냉각이 필수적이다. 고집적화에 따른 적외선 검출기의 열부하 증가에 대해 효과적으로 대응하기 위한 극저온 냉동기 특히 저진동, 소형, 경량의 극저온 냉동기가 요구되고 있다.⁽²⁾

† Corresponding Author, hkyeom@kimm.re.kr

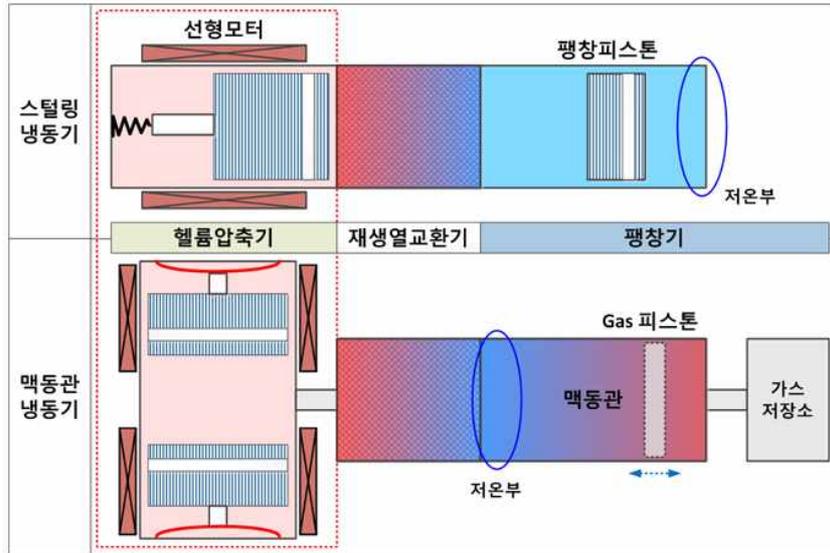


Fig. 1 Comparison of the Stirling and pulse tube cryocooler

스털링형 맥동관 냉동기는 저온부의 기계적 구동부를 열수력학적인 가스 피스톤(Gas piston)으로 대체함으로써 저 진동 및 고 신뢰성을 확보할 수 있지만 낮은 에너지효율과 제한적인 저온부의 형상으로 인해 활용도가 높지 못하였다. 그러나 최근 맥동관 냉동기의 기술발전으로 형태나 효율 면에서 스텔링 냉동기와 동등한 수준에 진입하였으며, 미국, 유럽 등에서는 방위산업, 우주과학 분야로의 활용이 증가하고 있다.

맥동관 냉동기의 장점을 활용하기 위해서는 기존 스텔링 냉동기의 저온부와 동일한 동축형 저온부 구조를 가져야 하고, 듀얼액팅(Dual acting) 방식의 이동 자석(Moving magnet)형 선형압축기를 이용하여 운전 신뢰성 및 수명을 높여야 한다. 이동 자석형 선형모터를 사용함으로써 발생할 수 있는 구동부의 마모를 최소화하기 위한 플렉서 베어링(Flexure bearing)이 필요하고, 장시간 안정적 성능을 확보하기 위해서는 가스누설이 발생되지 않도록 부품 구조설계 및 제작기술의 개발이 이루어져야 한다(Fig. 1).

2. 맥동관 냉동기

2.1 맥동관 냉동기 기술의 특징 및 활용 전망

맥동관 극저온 냉동기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 압력 파형을 생성하는 압축부와 팽창부의 가스공급을 수행하는 연결관, 압축과정에서 발생한 열을 제거하기 위한 고온 열교환기(Afercooler), 다공성 물질로 구성된 재생열교환기(Regenerator), 냉각대상으로부터 열을 흡수하는 저온 열교환기와 맥동관(Pulse tube), 압력 및 질량유량의 위상조절(Phase shift)을 통해 맥동관 내에 진행파(Progressive wave)를 생성하기 위한 위상조절기구로 구성되어 있다.

맥동관 냉동기는 압력파형을 발생하는 압축부의 형태에 따라 스텔링형, GM형, VM형으로 구분되며,⁽³⁾ 주로 스텔링형 및 GM형 맥동관 냉동기가 많이 사용되고 있다. 스텔링형과 GM형은 압축기와 열교환기를 연결하는 연결관에 설치되는 밸브의 유무에 따른 구분으로, 밸브가 없는 경우 스텔링형, 고압 및 저압을 생성하는 밸브가 있는 경우 GM형으로 구분된다. 따라서 스텔링형의 경우 냉동기 압력파형은 압축기의 운전주파수와 동일한 수십 Hz로 생성되며, GM형의 경우 밸브의 개폐수와 동일한 수 Hz의 운전주파수를 가지게 된다. 압력과 질량유량의 위상을 조절하는 위상조절기구로 가스저장소와 더불어 오리피스, 밸브 조합, 또는 관성관이 사용된다. GM형 맥동관 냉동기의 경우 오리피스 또는 밸브 조합이 많고, 스텔링형은 관성관이 주로 사용된다.

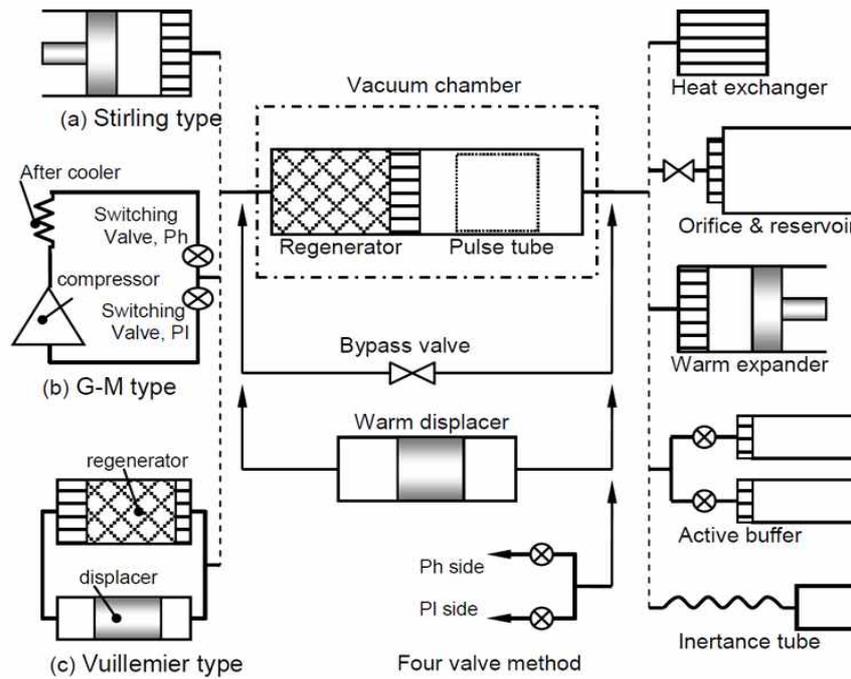


Fig. 2 Basic components of the pulse tube cryocooler

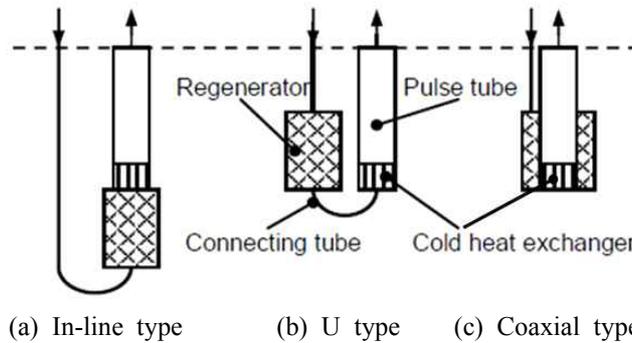


Fig. 3 Basic components of the pulse tube cryocooler

또한 냉동기 저온부의 맥동관과 재생열교환기 배치에 따라 in-line형, U형, 동축형 팽창기로 구분하기도 한다. 개발 초기에는 주로 in-line형이 많이 사용되었으나 저온부의 위치가 Fig. 3의 (a)와 같이 중간에 있어 응용에 제한이 많아 이를 개선하기 위한 U형, 동축형 등이 개발되었다. 동축형 팽창기는 스티링 냉동기와 외관상으로 차이점이 없어 기존의 스티링 냉동기 응용분야에서 큰 구조변경 없이도 활용할 수 있지만, 맥동관과 재생열교환기가 동축으로 배치되어야 하기 때문에 팽창기의 직경이 커지는 단점은 여전히 존재하고 있다. 그러나 최근 고해상도 요구에 따라 적외선검출기의 크기가 증가하고 있어 큰 직경의 팽창기 적용이 가능한 동축형이 적외선검출기 냉각의 주류가 될 것으로 전망된다.

2.2 설계 및 제작

2.2.1 맥동관 팽창기

맥동관 냉동기의 기본설계는 냉동기의 열역학적인 사이클 해석을 통해 요구 성능(냉동능력)을 만족할 수 있는 각 부품의 기하학적 치수를 구하는 과정으로, 상용 사이클 해석 프로그램인 SAGE⁽⁴⁾를 활용하였

다. Fig. 4는 맥동관 냉동기의 열역학적 해석을 위한 모델로 동축형 맥동관 팽창기, 관성관, 듀얼액팅 압축기 등으로 구성된다. 해석의 편이를 위해 가변적인 변위를 가지는 선형압축기를 고정된 행정체적의 압축모듈로 가정하였고, 해석은 고온부 온도 300 K, 저온부 온도 80 K에 대해 수행하였다.

재생기 튜브는 기계적인 특성, 제작성을 고려하여 스테인리스강으로 재질을 선정하였다. 재생열교환기는 해석결과를 근거로 스크린 메쉬(Screen mesh)를 선정하였다. 위상조절기구는 맥동관 저온부에서의 압력과 질량유량의 위상을 조절하는 역할로 관성관과 가스저장소를 선정하였다. Table 1은 맥동관 팽창기의 기본사양을 나타내고 있다. 실제 맥동관 냉동기는 선형압축기를 사용하기 때문에 충전압력, 냉동기 내부의 불용체적의 변화에 따른 운전조건의 변화가 발생하게 된다. 또한 선형압축기의 공진조건을 크게 벗어나는 운전주파수 영역에서는 정상적인 운전이 불가능하기 때문에 선형압축기의 운전특성을 고려한 설계가 필수적이다.

Table 1 Design results of pulse tube expander

Item (Co-axial type expander)		Design specification (0.8W @80K)
Regenerator	Type	Screen Mesh #400 (SS304)
	Porosity	0.6858
	Outer tube OD / Thickness (mm)	14 / 0.2
	Inner tube OD / Thickness (mm)	7.9 / 0.2
	Length (mm)	70
Pulse tube	ID / Length (mm)	7.5 / 72
Heat exchanger	Type	Screen Mesh #160 (Cu)
	Porosity	0.79
	Length (mm)	5
Inertance tube	Type	Double tube
	ID / Length (mm)	2.0 / 2.0, 2.5 / 2.0
Reservoir (cc)		169

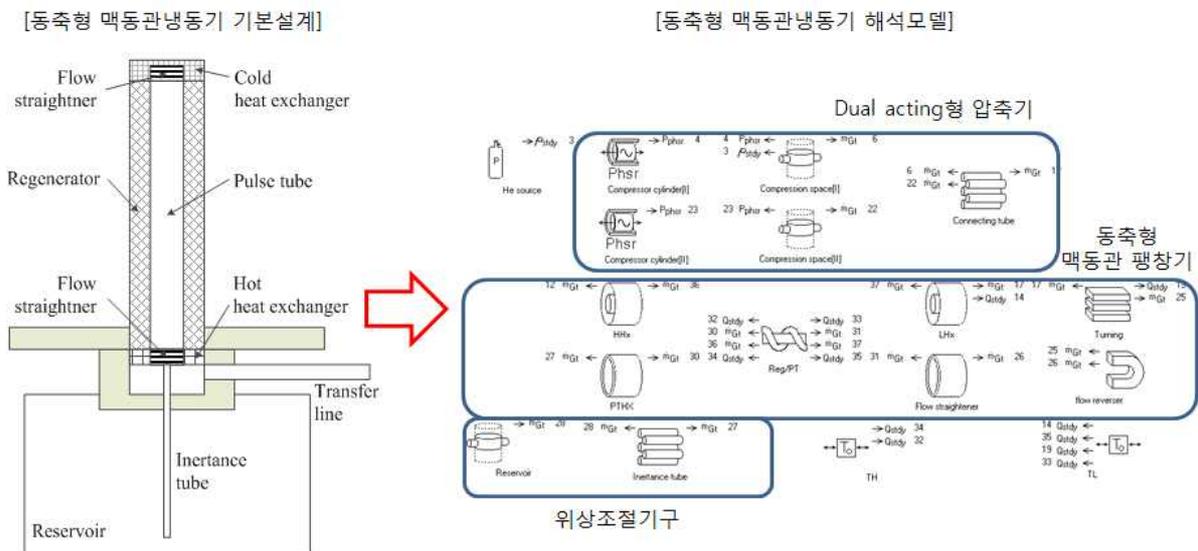


Fig. 4 A model of the pulse tube cryocooler for analysis



Fig. 5 Fabricated pulse tube expander

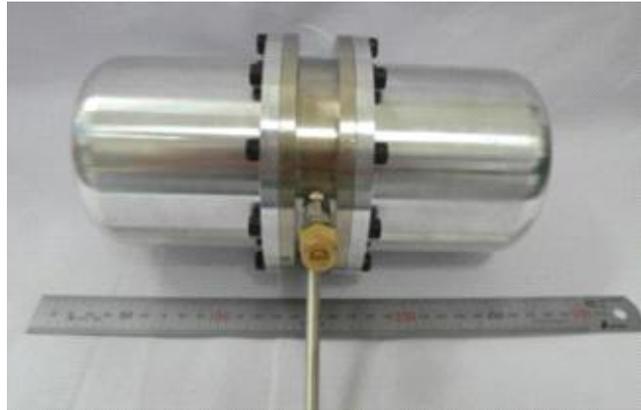


Fig. 6 Fabricated linear compressor

맥동관 팽창기 설계에서는 맥동관과 재생열교환기가 서로 열적으로 영향을 받지 않는 것으로 가정하고 해석을 수행하지만 실제의 경우 두 구성요소 사이에는 열적인 상호작용이 발생하게 된다. 따라서 맥동관 팽창기의 성능확보를 위해서는 팽창기 내부의 맥동관과 재생열교환기의 온도구배가 유사하게 생성되어야 한다. 또한 동축형의 구조적인 특성상 재생열교환기는 맥동관 튜브와 재생열교환기 튜브 사이에 위치하기 때문에 맥동관 직경 및 튜브 두께 역시 재생열교환기의 형상에 큰 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 맥동관과 재생열교환기가 고체를 통해 열적으로 영향을 미치는 요인을 최소화하기 위해 맥동관과 재생열교환기 사이에 진공층을 두는 구조로 설계, 제작하였다. 이로 인해 맥동관 팽창기의 외경이 커지게 되었고 제작 맥동관 팽창기의 외경은 25.4 mm이다(Fig. 5). 맥동관 팽창기의 고온부는 선형압축기에서 생성된 열을 충분히 방열하기 위해 고온부 외부를 핀 구조로 설계하였다. 냉동능력은 80 K에서 0.8 W가 목표이다. 제작은 설계 형상으로 가공된 부품들을 조립하고, 맥동관 냉동기 내부에 충전되는 헬륨가스의 누설을 방지하기 위해 접합(브레이징)공정을 거쳤다.

2.2.2 선형 압축기 설계 및 해석

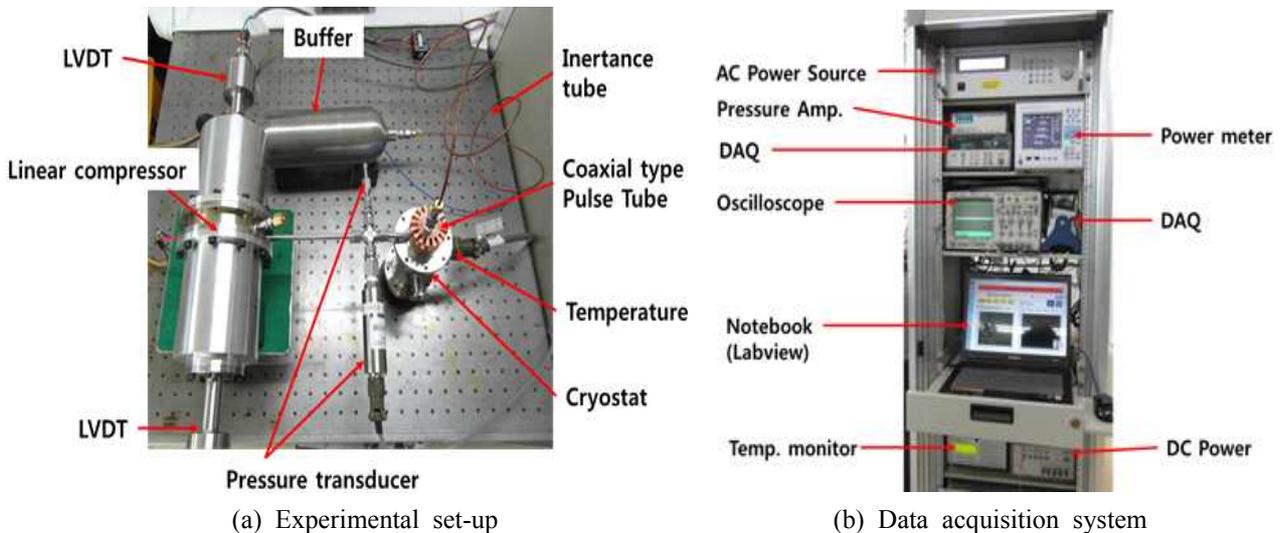
선형압축기는 스틸링형 맥동관 극저온 냉동기를 구동하기 위한 핵심 부품으로 저온 팽창기에 맥동 압력과 왕복 유동을 생성한다. 선형압축기는 선형 모터와 피스톤, 실린더로 이루어져 있고, 선형 모터에 의해 피스톤이 운동하면 압축 공간 내부에서 피스톤 운동에 의해 압력 및 유동이 생성된다. 이동 코일(Moving coil)형 선형모터는 고정된 영구자석에 의해 형성되는 자기장 내부에 움직이는 코일이 위치하고, 코일에 전류가 인가될 때 발생하는 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해 구동력이 발생한다. 이동 자석형은 요크와 철심으로 구성되는 자계 회로에서 고정된 코일에 전류를 인가할 때 자기력 균형이 깨지면서 추력이 발생한다. 일반적으로 이동 자석형에서 더 큰 추력을 얻을 수 있고, 기구적으로 연결되지 않은 피스톤이 움직이기 때문에 코일의 피로 파괴 현상도 나타나지 않는다. 따라서 본 과제에서는 2개의 이동 자석형 피스톤이 서로 반대방향으로 움직여 축방향 진동을 상쇄할 수 있는 구조를 선정하였다.

100 W급 선형 압축기 설계를 위한 목표 사양 및 설계 가이드라인은 다음과 같다.

- 전기 입력 : 100 W (50 W per 1 unit)/
- 저항열 손실 : 20 W (10 W per 1 unit)
- 마찰 손실 : 4 W (2 W per 1 unit)
- 선형압축기 효율 : 76 %
- 행정거리 : 12 mm (피스톤 진폭 = 6 mm)
- 공진 운전 범위 : 80 ~ 100° (공진 조건인 90° 조건에서 ±10° 오차범위 허용)
- 입력전류 크기 : 4 Arms (1.0 mm 구리선 적용)
- 작동 주파수 : 40 ~ 50 Hz

Table 2 Design results of linear compressor

Piston mass (mp), kg	0.25
Piston diameter (Dp), mm	18
Displacement (X0), mm	6
Spring constant (km), N/m	14000
Current (Irms), A	4
Frequency (f), Hz	50
Phase b/w P&X, degree	32.9
Damping loss, W	2
Thrust constant (KE), N/A	> 9.523
Effective coil resistance, Ohm	< 0.625
Coil dia. (include.coating), mm	1.05
Coil turns	120
Pressure amplitude (P0), kPa	296

**Fig. 7** Equipment of the performance test

100 W급 선형압축기의 동특성, 전자기 해석 등을 통해 결정된 최종 제작 사양은 Table 2와 같다. 설계 사양으로부터 제작되는 선형압축기는 40 ~ 60 Hz 범위에서 공진 운전 조건을 만족할 수 있으며, 40, 50, 60 Hz 공진 운전에서 전기입력 기준 각각 100, 120, 140 W의 용량을 보일 것으로 예측된다. 직경은 외형 기준으로 100 mm, 길이는 250 mm의 크기를 갖는다(Fig. 6).

2.3 맥동관 냉동기 성능실험

2.3.1 장치 구성

맥동관 냉동기의 성능실험을 위해 선형압축기, 맥동관 팽창기, 관성관, 기체저장소의 부품을 조립, 설치 후 냉각실험 수행하였다. 냉각실험에서는 맥동관 냉동기의 입력전원을 제한하고, 냉동기의 운전제어를 위해 듀얼 액팅형 선형압축기 양측 피스톤에 변위센서(LVDT)를 설치하고, 측정된 피스톤 변위를 모니터링 하여 피스톤이 충돌하지 않는 범위에서 전원을 인가하였다.

실험에서는 다양한 범위의 충전압력, 작동주파수, 관성관의 변화에 대해 맥동관 냉동기의 입력전력,

피스톤변위, 압축공간 내부의 압력변화, 맥동관 팽창기 저온 끝단의 온도를 측정하였다.

2.3.2 실험결과 및 고찰

극저온 냉동기는 부하 조건에서의 냉각 능력도 중요하지만, 무부하 최저 도달온도 및 초기 냉각 시간 또한 중요한 사양이다. 측정된 결과로부터 무부하 최저도달온도는 67.47 K이고, 상온(300 K)부터 100 K 까지 냉각 시간은 18.7 분, 80 K까지는 25.5 분, 최저도달온도인 67.47 K까지는 52.8 분의 시간이 소요되었다. 열부하가 증가할수록 저온부 온도가 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났고, 5.0 Arms의 입력 전류 운전시 0.8 W at 80 K의 목표를 달성하였다. 입력 전력 대비 압축 PV 일로 계산되는 선형압축기 압축 효율 또한 70~72 %로 성능을 만족함을 알 수 있다(Fig. 8).

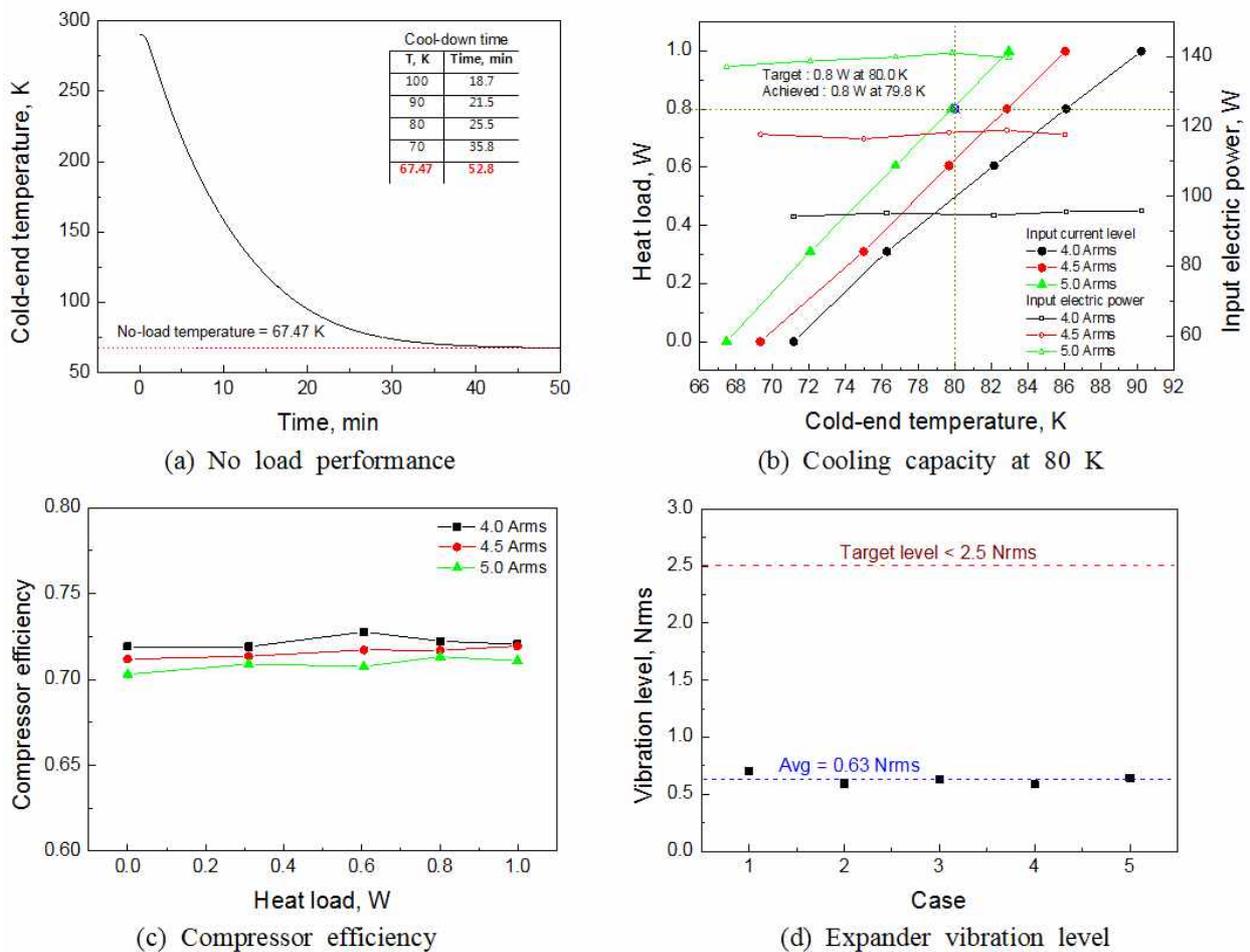


Fig. 8 Results of performance test

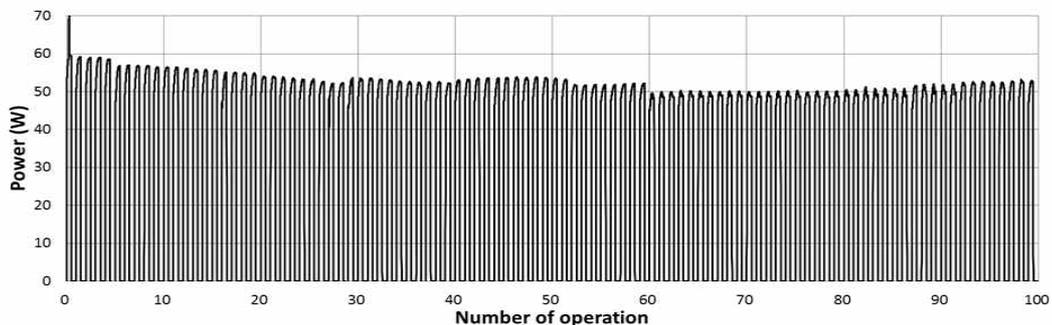


Fig. 9 On/off test for the life prediction (100 operation cycle)

Fig. 9는 초기고장 진단 및 수명예측을 위한 100회의 단속운전 실험으로, 실험 후 운전을 통해 손상이 발생할 수 있을 것으로 예측되는 부위를 중점적으로 점검하였다. 점검 결과 피스톤 조립체, 실린더, 플렉서 베어링 등 구동부에서 특기할 만한 마모 및 손상 부위를 발견되지 않음으로써, 제작된 맥동관 냉동기는 운전신뢰성 및 내구성이 확보된 것으로 판단할 수 있다.

3. 결 론

본 과제를 통해 선형압축기 설계, 제작 및 해석 기술, 맥동관 팽창기 설계, 제작 및 성능평가 기술을 확보하여 기존 스텔링 냉동기를 대체할 수 있는 0.8 W@ 80 K의 맥동관 냉동기를 성공적으로 개발하였다. 확보된 기술은 고 신뢰성을 요구하는 2020년 달탐사 궤도선 및 착륙선 적용을 위한 우주용 극저온 냉동기의 기반기술로 활용이 기대된다. 또한 고성능 선형압축기 기술은 차세대 열상장비에 적외선검출기 냉각을 위한 냉동기의 성능향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

개발된 맥동관 극저온 냉동기술은 향후 독자적인 위성, 미사일방어, 무인항공기, 적외선 응용시스템 개발에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 내용은 한국기계연구원 주요사업(창의형 과제) 연구 결과의 일부임.

참고문헌 (References)

- (1) Ray Radebaugh, 2000, "Pulse Tube Cryocooler For Infrared Sensor," *Proceedings of SPIE, International Society for Optical Engineering, Infrared Technology and Application XXVI*, Vol. 4130, pp. 363~379.
- (2) Maxtech International, Inc., 2012, *The World Market for Military Infrared Imaging Detectors and Systems*, Maxtech International, Inc.
- (3) Yoichi Matsubara and Deuk-Yong Koh, 2010, "Progress of Pulse Tube Cryocooler," *Superconductivity and Cryogenics*, Vol. 12, No. 4, pp. 1~7.
- (4) D. Gedeon, 1999, *SAGE Pulse-Tube Model Class Reference Guide*, Gedeon Associates.