

동축형 스티어링 맥동관 냉동기의 성능개선에 관한 연구

박성제^{†*}·홍용주*·김효봉*·김양훈**

A Study for Performance Improvements in the Coaxial Type Stirling Pulse Tube Cryocooler

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

Key Words: Pulse tube cryocooler(맥동관 냉동기), Linear compressor(선형압축기), Regenerator(재생기)

Abstract

The most compact and convenient pulse tube cryocooler for practical applications is the coaxial type. It can replace Stirling cryocooler without any change to the Dewar or the connection to the cooled devices. The experimental results of the coaxial inertance tube pulse tube cryocooler for cooling superconductor RF filter are presented in this paper. To find optimal conditions of inertance tube pulse tube cryocooler, no load temperature according to the variations of inertance tube volume, reservoir volume are measured, and the cool down characteristics at the particular conditions are presented. In case of the coaxial type inertance tube pulse tube refrigerator, cool down time is the lowest in the inertance tube diameter of 1.3 mm and inertance tube length of 1900 mm and lowest temperature is 112K. This results are not satisfactory for practical applications. So, We propose vacuum insulation between regenerator and pulse tube in the Stirling type coaxial pulse tube cryocooler. Stirling type coaxial pulse tube cryocooler with the vacuum insulation between regenerator and pulse tube was designed and manufactured by KIMM(Korea Institute of Machinery and Materials). The optimal conditions will be tested for Stirling type coaxial pulse tube cryocooler with the vacuum insulation between regenerator and pulse tube.

1. 서 론

맥동관 냉동기는 1960년대 중반 Gifford와 Longworth에 의해 처음으로 개발되었고, 이후 1984년 Mikulin 등이 오리피스 맥동관 냉동기를, 그리고 1986년 Radebaugh 등이 현재 사용되어지는 오리피스형 맥동관 냉동기를 개발하여 처음으로 60K에 도달하였다.

1990년에는 압축기 출구와 맥동관의 고온부 사이에 연결관을 설치한 이중관 맥동관 냉동기

(double inlet pulse tube refrigerator)가 S.Zhu 등에 의해 제안되었다. 스티어링형 맥동관 냉동기의 성능을 향상시키기 위해서는 주로 관성관(inertance tube)을 사용한다. 즉, 관성관을 사용함으로써 맥동관에서 압력과 질량유속 사이의 위상차를 최적화하여 스티어링 냉동기와 유사한 성능을 유지할 수 있다.

극저온 냉동기에서 냉동효과는 저온부에서 질량유량과 압력의 위상차를 조절하여 얻을 수 있는데, 스티어링 냉동기(Stirling refrigerator)는 저온부 변위기와 피스톤간의 상대적인 거동에 의해, 맥동관 냉동기(Pulse tube refrigerator)는 1개 혹은 2개의 임피던스 조절에 의해 가능하다.

관성관 맥동관 냉동기는 압력파형을 생성하는 압축부(compression space), 압축부와 팽창부(expansion space)를 연결하는 연결관, 다공성 물

† 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

E-mail : sjpark@kimm.re.kr

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

* 한국기계연구원

** 부산대학교

질로 채워진 재생기(regenerator), 저온 열교환기, 맥동관(pulse tube), 그리고 압력 및 질량유량의 위상조절(phase shift)을 통해 맥동관 내에 진행파(progressive wave)를 생성하기 위한 관성관(inertance tube)과 저장소(buffer)로 구성되어 있다.

관성관형 맥동관 냉동기의 상세 해석은 S.Zhu 등에 의해 보고 되었다.

최근에 de Boer는 관성관형 맥동관 냉동기의 성능은 제한된 작동 주파수에도 불구하고 오리피스 맥동관 냉동기에 비해 우수하고, 관성관의 길이, 직경, 맥동관의 체적, 재생기의 열전도성, 충전압력 및 작동주파수의 함수라는 것을 보였다.

본 연구에서는 선형압축기를 이용한 동축형 관성관 맥동관 냉동기의 열 성능특성을 조사한 뒤, 성능을 향상시키기 위하여 재생기와 맥동관 사이에 진공단열공간을 두어 재생기와 맥동관 사이의 열교환 손실을 제거하고, 재생기 재질 및 맥동관과 재생기의 체적비와 관성관 효과 등에 의한 냉각특성을 조사하여 동축형 맥동관 냉동기의 상용화를 위한 최적화 방안을 제시하고자 한다.

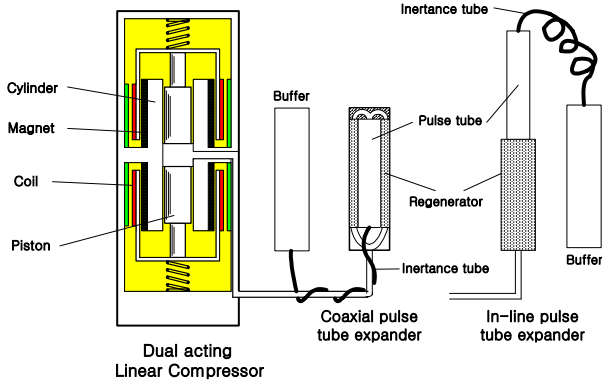


Fig. 1 Schematic diagram of coaxial type and in-line pulse tube refrigerator

2. 실험장치 및 방법

2.1 맥동관과 재생기의 배열형태 구조

맥동관 냉동기에 있어서 맥동관과 재생기의 배열 형태에 따라서 직렬형(in-line type), U형(U type), 동축형(coaxial type)으로 구분할 수 있으며 Fig. 1은 직렬형과 동축형 맥동관 냉동기의 구조를 나타내었다.

이 중에서 직렬형이 가장 효율이 좋지만 저온부가 고온 열교환기 사이에 위치함으로 인해 냉각 장치(cooling devices)를 연결하는데 있어서 불편함을 초래할 수 있다는 단점이 있다. 실제 가장 간단하고 편리한 형태는 동축형으로서 스테어링 냉동기에 사용되는 Dewar 및 냉각장치를 바로 연결해서 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 재생기와 맥동관 간의 온도 분포의 부조화, 저온부의 손실체적, 효율저하를 야기시킬 수 있는 저온부에서의 역유동 유발 등의 단점을 내포하고 있다. 그리고 U자형은 냉각장치를 쉽게 설치할 수 있으며, 진동에 의해 유발되는 측력(side force)을 최소화 할 수 있지만 저온부에서의 운전체적의 증가로 인해 성능저하를 초래할 수 있다.

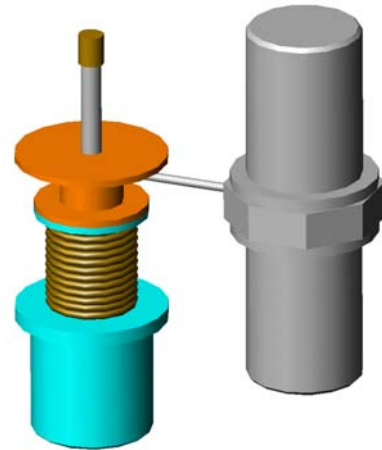


Fig. 2 Structural shape of the coaxial type inertance tube pulse tube refrigerator

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2는 선형압축기를 이용한 동축형 맥동관 냉동기의 3차원 구조를 보여주고 있으며, Fig. 3은 동축형 맥동관 냉동기의 실험 장치를 보여 주고 있다.

본 실험에 사용된 선형압축기는 Leybolds사의 Polar SC-7 COM을 사용하였고, 동축형 맥동관 냉동기의 상세 사양은 Table 1에 나타내었다.

관성관의 내경 및 길이 변화에 따른 동축 관성관형 맥동관 냉동기의 성능 특성을 고찰하고자 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 온도센서를 저온부 열교환기 상단에 부착하였고, 압력센서를 선형압축기와 재생기를 연결하는 연결관, 맥동관 고온부 그리고 저장소에 각각 설치하였다.

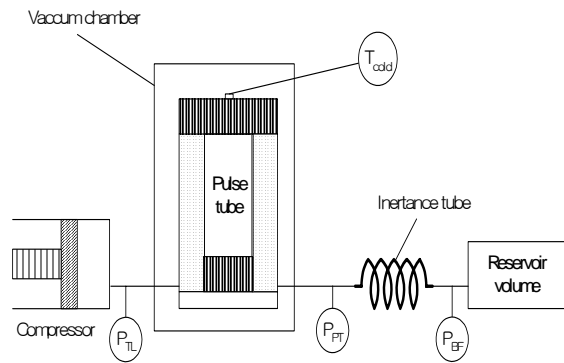


Fig. 3 Experimental apparatus of the coaxial type inertance tube pulse tube refrigerator

Table 1 Specifications of IPTR

Item	Coaxial type IPTR
Compressor	Polar SC-7
Charging pressure	25kgf/cm ² (G) Helium
Regenerator mesh	#250
Regenerator volume	10.1cc
Pulse tube diameter	0.95cm
Pulse tube volume	5.7cc
Inertance tube diameter	1.3/2.7/3.0mm
Inertance tube Length	0.95/1.9/2.85mm
Buffer volume	1000cc

관성관의 내경 및 길이 변화에 따른 동축 관성관형 맥동관 냉동기의 성능 특성을 고찰하고자 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 온도센서를 저온부 열교환기 상단에 부착하였고, 압력센서를 선형압축기와 재생기를 연결하는 연결관, 맥동관 고온부 그리고 저장소에 각각 설치하였다.

주위로부터의 열침입을 차단하기 위해 동축형 재생기 및 맥동관을 진공챔버내에 설치하였고, 실험 중 진공챔버의 진공도는 확산 진공펌프 시스템 (Diffusion pump system)를 사용하여 10-5torr 정도로 유지하였다.

선형압축기를 구동시키기 위해 운전주파수, 입력 전류, 전압을 공급 및 조절할 수 있는 Fujitz사의 교류전원 공급장치(AC power supply)를 사용하였다.

맥동관 냉동기의 저온부 온도 측정을 위해 Lakeshore사의 silicon diode 온도센서를 부착하였

고, 데이터 취득은 Lakeshore사의 330 temperature controller를 사용하였다.

또한 맥동관 냉동기의 압력 및 위상특성을 파악하고자 PCB사의 압력센서를 사용하였다.

실험은 관성관 변화에 따른 동축형 맥동관 냉동기의 성능을 고찰하고자 관성관의 길이 및 내경을 변화시키면서 각각 실험을 수행하였다. 실험조건은 예비실험에서 가장 성능이 좋게 나왔던 작동주파수 50Hz, 인가전압 30V, 그리고 충전압력 25kgf/cm²G 조건으로 하였다.

3. 실험결과

관성관 내경변화에 따른 강온특성을 알아보기 위해 관성관 길이 1900mm를 사용하여 내경을 각각 1.3mm, 2.7mm, 3.0mm 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험조건은 충전압력 25kgf/cm²G, 작동주파수 50Hz, 인가전압 30V 하에서 실험을 수행하였다.

실험결과 관성관 길이 1900mm에 대하여 본 실험에서 관성관의 내경이 작을수록 최저도달온도가 낮았음을 알 수가 있었다. 이 때 관성관의 길이 1900mm, 내경이 1.3mm일 때 최저도달온도는 112K이었다.

또한 관성관 길이변화에 따른 강온특성을 알아보기 위해 관성관 내경 1.3mm를 사용하여 길이를 각각 950mm, 1900mm, 2850mm 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 실험조건은 충전압력 25kgf/cm²G, 작동주파수 50Hz, 인가전압 30V하에서 실험을 수행하였다.

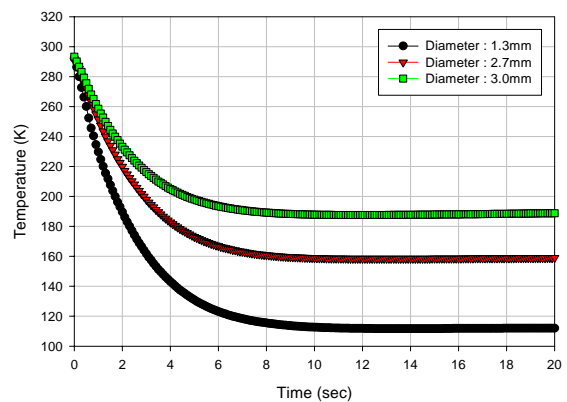


Fig. 4 No load temperature varying inertance tube diameter(inertance tube length: 1900mm, operating frequency: 50Hz, input voltage: 30V)

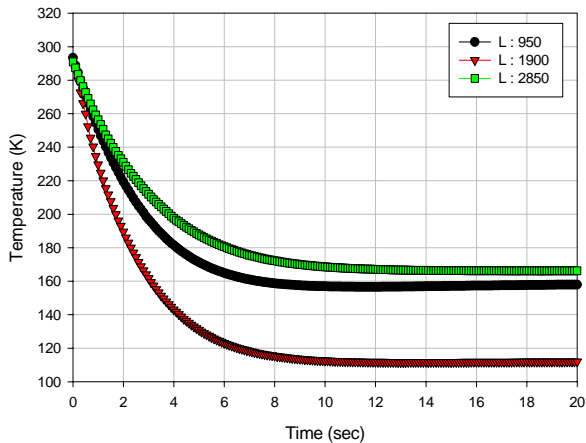


Fig. 5 No load temperature varying inertance tube length(inertance tube inner diameter : 1900mm, operating frequency : 50Hz, input voltage : 30V)

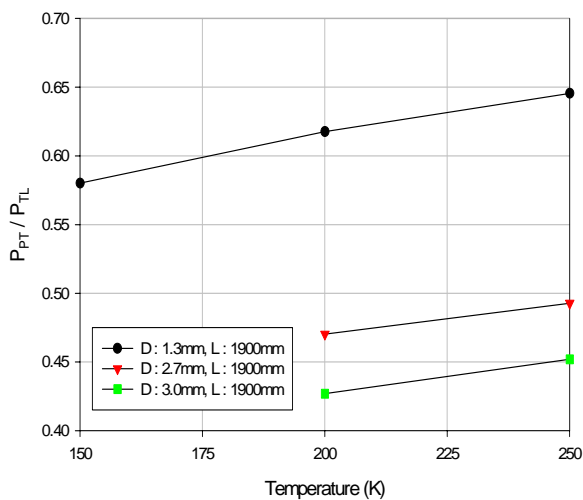


Fig. 6 Non-dimensional pressure vs cold head temperature varying inertance tube diameter and length(operating frequency : 50Hz, input voltage : 30V)

실험결과 관성관 내경 1.3mm에 대하여 최적의 관성관 길이는 1900mm로서 이 때 최저도달온도는 112K이었다.

Fig. 6은 온도에 따라 맥동관 고온부에서의 압력 대 연결관에서의 압력을 무차원 시킨 것으로서 온도가 강하함에 따라 맥동관에서의 압력진폭은 선형적으로 감소하며, 같은 온도 영역에서는 관성관의 내경이 감소할수록 맥동관의 압력진폭이 크게 나타났다. 이는 관성관의 내경이 증가할수록 맥동관에서의 압축비가 감소함을 나타낸다.

4. 동축형 맥동관 냉동기의 개선방향

3장에서 실험결과는 주로 77K에서 약 5W의 냉동능력을 필요로 하는 응용분야에 실용적으로 활용할 수 없을 뿐만 아니라 효율면에서도 만족스럽지 못한 결과이다. 이와 같은 결과에 대한 원인은 맥동관의 체적이 용량에 비해 작을 뿐만 아니라 맥동관에 대한 재생기의 체적이 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한 재생기의 내부 벽면과 맥동관 외부벽면 사이의 열교환에 의해 열손실이 증대한 것도 주요 요인으로 분석된다.

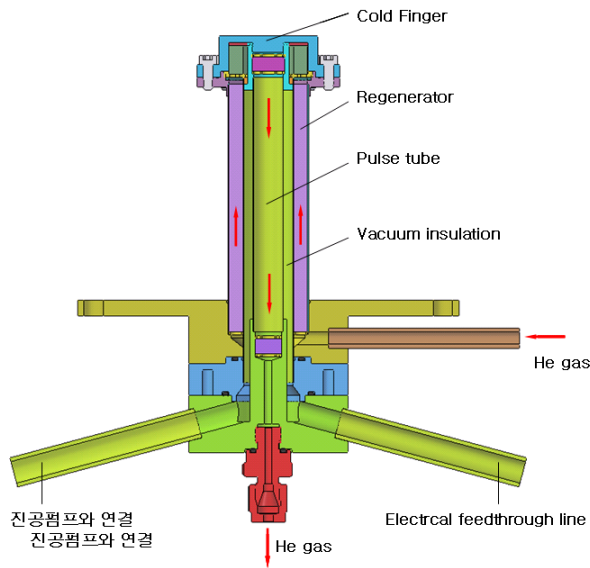
따라서 동축형 맥동관 냉동기의 맥동관 체적을 크게 하고, 맥동관 체적에 대한 재생기 체적을 증대시킨 후, 재생기의 내부 벽면과 맥동관의 내부 벽면사이를 진공 단열이 가능하도록 설계, 제작하여 이러한 문제점들을 해결하고자 한다.

제작된 동축형 맥동관 냉동기는 핵심부품들이 쉽게 탈 부착이 가능하도록 설계되었기 때문에 여러 가지 실험변수들을 변화시키면서 최적화가 가능하다. 특히 저온부(cold finger)에 쉽게 탈 부착이 가능하고, 저온에서 실링이 가능한 금속실링을 사용하였고, 재생기의 내부 벽면과 맥동관의 내부 벽면사이의 진공도를 조절할 수 있도록 하여 다양한 실험이 가능하게 되어 있다.

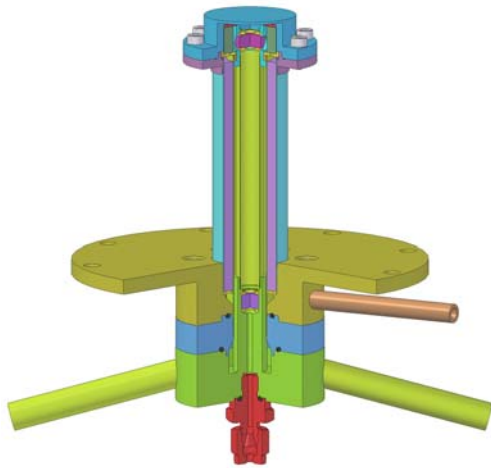
Fig. 7은 설계, 제작된 동축형 스텔링 맥동관 냉동기의 단면, 절단면, 3-D 도면 등을 보여주고 있으며, Photo 1은 설계, 제작된 동축형 스텔링 맥동관 냉동기의 사진을 보여주고 있다.

이와 같이 제작된 동축형 스텔링 맥동관 냉동기를 이용한 주요 성능실험방법을 정리하면 다음과 같다.

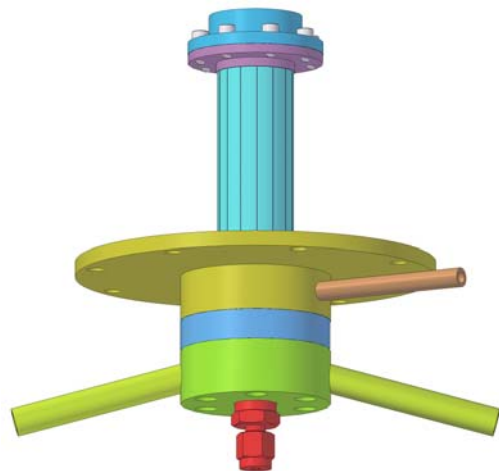
- 1) 재생기 재질 및 메쉬수에 따른 냉각특성
- 2) 재생기의 내부 벽면과 맥동관의 내부 벽면 사이의 진공도 변화 및 충전가스의 변화에 따른 냉각특성
- 3) 재생기와 맥동관의 고온부로부터 저온부까지의 온도분포 측정
- 4) 재생기의 충전 길이에 따른 냉각특성 및 맥동관과 재생기의 온도분포 특성
- 5) 재생기 체적과 맥동관의 체적비에 따른 냉각특성 변화
- 6) 관성관 또는 이중관, 오리피스 맥동관 냉동기에 따른 냉각특성 변화 및 각 변수들의 영향 조사



(a) Cross section



(b) 1/4 Cutting section



(c) 3-D drawing

Fig. 7 Drawings of the Stirling type coaxial pulse tube cryocooler



Fig. 8 Stirling type coaxial pulse tube cryocooler

5. 결 론

본 연구에서는 동축형 관성관 맥동관 냉동기의 성능을 향상시키기 위하여 동축형 맥동관 냉동기의 냉각 특성에 영향을 미치는 인자와 그에 따른 영향을 고찰하고, 성능을 개선하여 최적화 실험을 수행하기 위하여 맥동관 외부벽면과 재생기 내부벽면 사이를 진공단열이 가능하도록 제작하여 성능시험방법을 알아보았다.

우선 동축형 맥동관 냉동기에서 관성관 길이 및 내경 변화에 따른 동축 관성관형 맥동관 냉동기의 최적상태는 내경이 1.3mm, 그리고 길이가 1900mm이었다. 또한 관성관의 내경이 증가할수록 관성효과가 증가하여 맥동관에서의 압축비가 선형적으로 감소하였으며, 냉각속도의 감속을 초래하였다.

이와 같은 실험결과는 주로 77K에서 약 5W의 냉동능력을 필요로 하는 응용분야에 실용적으로 활용할 수 없을 뿐만 아니라 효율면에서도 만족스럽지 못한 결과이다.

따라서 동축형 맥동관 냉동기의 맥동관 체적을 크게 하고, 맥동관 체적에 대한 재생기 체적을 증대시킨 후, 재생기의 내부 벽면과 맥동관의 내부 벽면사이를 진공 단열이 가능하도록 설계, 제작하여 이러한 문제점들을 해결하고자 한다.

제작된 동축형 맥동관 냉동기에 대한 최적화실험은 4장에서 제시된 실험방법을 이용하고, 이를 통해 상용화를 위한 동축형 맥동관 냉동기 시제품을 제작하여 환경시험과 수명시험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2003년도 민군겸용 기술개발사업 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) R. Radebaugh, 2000, "Development of the Pulse tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler", Proceedings Institute of Refrigeration, London.
- (2) G. Walker, 1989, "Miniature Refrigerators for Cryogenic Sensors and Cold Electronics", New York, Oxford University Press.
- (3) Gifford, W. E. and Longworth, R. C., 1964, "Pulse Tube Refrigeration", Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, Paper No. 63-WA-210.
- (4) Radebaugh, R., Zimmerman, D. R. Smith and Louie, B., 1985, "A Comparison of three types of Pulse Tube Refrigerators : New Methods for reaching 60K", Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 31, pp. 779.
- (5) Zhu, S. et al., 1990, "Double inlet Pulse Tube Refrigerators : An Important improvement", Cryogenics. 30, pp. 514-520.
- (6) Zhu, S. W., Zhou, S. L., Yoshimura, N. and Matsubara, Y., 1997, "Phase Shift Effect of the Long Neck Tube for the Pulse Tube Refrigerator", Cryocoolers 9, pp. 269-278.
- (7) de Boer, P. C. T., 2002, "Performance of the inertance pulse tube", Cryogenics, Vol. 42 , pp. 209-221.