

관성관형 동축 맥동관 냉동기의 특성에 관한 연구

김양훈, 박성제*, 홍용주*, 김효봉*, 이승홍**
부산대학교 기계공학과 대학원, 한국기계연구원*, 부산대학교 기계공학과**

The study of the Characteristic of the Coaxial Type Inertance Pulse Tube Refrigerators

Yang-Hun Kim, Seong-Je Park*, Yong-Ju Hong*, Hyo-Bong Kim*, Sung-Hong Lee**
Graduate School of the Pusan National University, Korea Institute of Machinery & Materials*,
Pusan National University**

yhkim@kimm.re.kr

Abstract - There are three types that geometrical arrangement of the pulse tube and regenerator - in line type, U type, and coaxial type.

The most compact and convenient one practical applications is the coaxial type. It can replace Stirling cryocooler without any change to the Dewar or the connection to the cooled devices.

To investigate effects of the inertance tube, we perform experiments with varying inertance tube inner diameter and length. The experimental results show that optimum inertance tube inner diameter and length are 1.3mm, 1900mm respectively.

이러한 맥동관 냉동기는 맥동관 냉동기의 재생기와 맥동관의 배열에 따라 직렬형(in-line type), U형(U type), 동축형(coaxial type)으로 구분할 수 있는데, 직렬형은 저온부(cold head)에 손실체적이 없고 맥동관 내에 난류가 형성되지 않아 효율이 가장 높지만 구조상 고온부 사이에 저온부를 위치시키기가 어려운 단점을 가지고 있다. 동축형은 스텔링 냉동기와 유사한 가장 단순한 형태이지만 구조상에 잠재적인 문제점을 내포하고 있으며 재생기 및 맥동관 내에서 온도 분포의 부조화 형성으로 인해 열전달이 발생하여 열부하가 발생하여 효율이 저하된다는 단점이 있다.

본 연구에서는 동축 관성관형 맥동관 냉동기를 제작하고 관성관의 길이 및 내경변화에 따른 성능 특성을 고찰하고자 한다.

1. 서 론

맥동관 냉동기는 1960년대 중반 Gifford와 Longsworth[1]에 의해 처음으로 개발되었고, 이후 1984년 Mikulin 등[2]이 오리피스 맥동관 냉동기를, 그리고 1986년 Radebaugh 등[3]이 현재 사용되어지는 오리피스형 맥동관 냉동기를 개발하여 처음으로 60K에 도달하였다.

극저온 냉동기에서 냉동효과는 저온부에서 질량유량과 압력의 위상차를 조절하여 얻을 수 있는데, 스텔링 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 물질로 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.

2. 본 론

2.1 맥동관과 재생기의 배열형태

맥동관 냉동기에 있어서 맥동관과 재생기의 배열 형태에 따라서 다음과 같이 직렬형(in-line type), U형(U type), 동축형(coaxial type)으로 구분할 수 있으며 Fig. 1에 각각 그 형태를 나타내었다.[4]

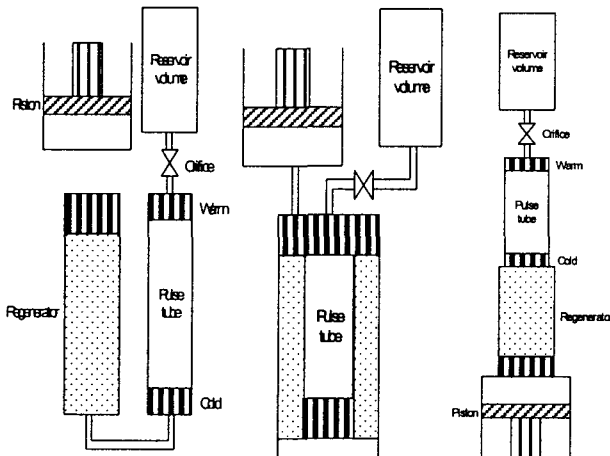
이 중에서 직렬형이 가장 효율이 좋지만 저온부가 고온 열교환기 사이에 위치함으로 인해 냉각 장치(cooling devices)를 연결하는데 있어서 불편함을 초래할 수 있다는 단점이 있다. 실제 가장 간단하고 편리한 형태는 동축형으로서 스텔링 냉동기에 사용되는 Dewar 및 냉각장치를 바로 연결해서 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 재생기와 맥동관 간의 온도 분포의 부조화, 저온부의 손실체적, 효율저하를 야기시킬 수 있는 저온부에서의 역유동 유발 등의 단점을 내포하고 있다. 그리고 U자형은 냉각장치를 쉽게 설치할 수 있으며,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

2.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 선형압축기는 Leybolds사의 Polar SC-7 COM을 사용하였고, 재생기의 직경 및 길이는 각각 15.88mm, 80mm이며 사용된 재생물질은 SUS 재질의 mesh #250이다. 맥동관의 직경 및 길이는 각각 9.53mm, 80mm이며, 저장소(buffer volume)의 체적은 1000cc이다. 그리고 관성관의 내경은 각각 1.3mm, 2.7mm, 3.0mm, 길이는 각각 950mm, 1900mm, 2850mm으로 제작하였다.

관성관의 내경 및 길이 변화에 따른 동축 관성관형 맥동관 냉동기의 성능 특성을 고찰하고자 Fig. 2에 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^{-5} torr 정도로 유지하였다.



(a) U-type (b) coaxial type (c) in-line type
Fig. 1. Three different geometries for pulse tube refrigerators.

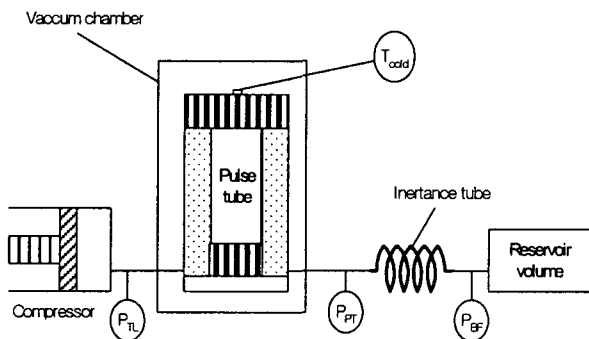


Fig. 2. The location of measuring of temperature and pressures

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 부착하였고, 데이터 취득은 Lakeshore사의 330 temperature controller을 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 $25\text{kg/cm}^2\text{G}$ 조건으로 하였다.

선형압축기는 시스템의 체적에 따라 운전주파수가 결정되며, 이는 저온부의 온도, 운전체적 및 충전압력에 따라 변화하게 되고, 일반적으로 운전체적이 증가하면 선형압축기의 고유주파수가 감소하고, 충전압력이 증가하면 고유주파수가 증가하는 경향을 나타낸다[5].

2.3 실험결과 및 고찰

관성관 내경변화에 따른 강온특성을 알아보기로 관성관 길이 1900mm을 사용하여 내경을 각각 1.3mm, 2.7mm, 3.0mm 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험조건은 충전압력 $25\text{kg/cm}^2\text{G}$, 작동주파수 50Hz, 인가전압 30V하에서 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.

일반적으로 관성관의 내경이 크면 관성의 효과가 크게 작용하지만 맥동관에서의 압력비가 감소하여 냉각속도 및 냉동능력의 감소를 초래한다. 또한 내경이 너무 작을 경우 헬름의 점성침투깊이보다 작기 때문에 관성효과가 나타나지 않아 위상조절이 안될 수 있다. 따라서 본 실험장치에서의 내경이 큰 관성관 사용은 부적합함을 알 수가 있었다.

관성관 길이변화에 따른 강온특성을 알아보기로 관성관 내경 1.3mm을 사용하여 길이를 각각 950mm, 1900mm, 2850mm 변화시키면서 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험조건은 충전압력 $25\text{kg/cm}^2\text{G}$, 작동주파수 50Hz, 인가전압 30V하에서 실험을 수행하였다.

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

Fig. 5는 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.

3. 결 과

동축 관성관형 맥동관 냉동기를 제작하여 관성관의 길이 및 내경변화에 따른 성능 특성을 고찰하고자 실험한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 실험에서의 관성관 길이 및 내경 변화에 따른 동축 관성관형 맥동관 냉동기의 최적상태는 내경이 1.3mm, 그리고 길이가 1900mm이다.
- 2) 관성관의 내경이 증가할수록 관성효과가 증가하여 맥동관에서의 압축비가 선형적으로 감소하였으며, 냉각속도의 감속을 초래하였다.

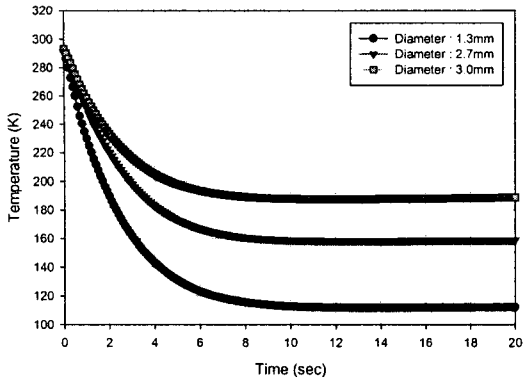


Fig. 3. No load temperature varying inertance tube diameter at inertance tube length : 1900mm, operating frequency : 50Hz, input voltage : 30V

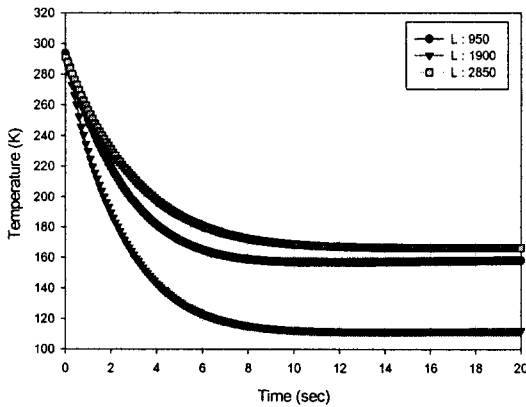


Fig. 4. No load temperature varying inertance tube length at inertance tube inner diameter : 1900mm, operating frequency : 50Hz, input voltage : 30V

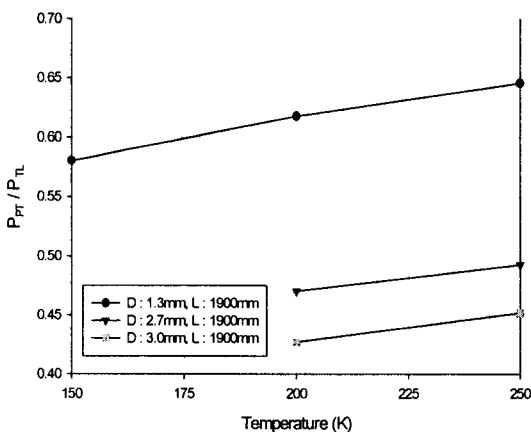


Fig. 5. Non-dimensional pressure vs cold head temperature varying inertance tube diameter and length at operating frequency : 50Hz, input voltage : 30V

[참 고 문 헌]

- [1] Gifford, W. E. and Longsworth, R. C., "Pulse Tube Refrigeration", Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, Paper No. 63-WA-210, 1964
- [2] Mikulin, E. I., Tarasov, A. A. and Shkrebyonock, M. P., "Low Temperature Pulse Tube Refrigeration", Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 29, pp.629-637, 1984
- [3] Radebaugh, R., Zimmerman, D. R. Smith and Louie, B., "A Comparison of three types of Pulse Tube Refrigerators : New Methods for reaching 60K", Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 31, pp. 779, 1985
- [4] Radebaugh, R., "Pulse Tube Cryocoolers for Cooling Infrared Sensors", Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, Infrared Technology and Applications XXVI, Vol. 4130, pp.363-379, 2000
- [5] Hong, Y. J., Park, S. J., Kim, H. B., Koh, D. Y. and Yu, B. K., "Study of the Linear Compressor Characteristics of the Stirling Refrigerator", J. of KAISC, Vol. 3, No. 2, pp. 49-54, 2001