

관성관 맥동관 냉동기의 성능에 관한 해석적 연구

홍용주, 박성제, 김효봉, 최영돈*
한국기계연구원, *고려대학교

The Study of the performance analysis of the inertance Pulse Tube refrigerator

Yong-Ju Hong, Seong-Je Park, Hyo-Bong Kim, Young-Don Choi*
Korea Institute of Machinery & Materials, *Korea Univ.,

yj hong@kimm.re.kr

Abstract - Cooling with easy, reliable cryocooler is highly desirable for the commercial and military application. The pulse tube refrigerator has no moving parts at the cold end, so that the mechanical vibration and magnetic noise can be reduced to the low level with higher reliability and longer lifetime than the Stirling cryocooler.

The inertance tube improve the performance of pulse tube refrigerator by providing optimal phase shift between pressure and mass flow rate, and it is easiest to implement at large cooling capacity and high operating frequency.

In this study, the performance of the inertance pulse tube refrigerator was investigated by analysis. The results show the influence of the diameter and length of the inertance tube on the performance of the refrigerator.

1. 서 론

맥동관 냉동기(Pulse tube refrigerator, 이하 PTR)는 1960년대 중반 Gifford와 Longworth[1]에 의해 기본형 맥동관 냉동기(Basic PTR)가 개발된 이래, 1984년 Mikulin[2]에 의해 오리피스형 맥동관 내부에 내장된 오리피스형 및 1985년 NIST의 Radaubaugh[3]에 의해 맥동관 외부에 오리피스가 설치된 오피피스형 맥동관 냉동기(Orifice type PTR)가 개발되어, 기존의 Gifford-McMahon 냉동기 및 스텔링 냉동기(Stirling refrigerator) 등의 극저온 냉동기를 대체할 수 있는 성능에 도달하였다.

맥동관 냉동기는 기존의 극저온 냉동기들이 저온부에 기계적 구동부(변위기(displacer) 또는 팽창피스톤)를 가지기 때문에 인체 필연적으로 냉각부에 기계적 진동이 발생하여 장시간 운전시 이에 따른 성능저하가 발생하는 문제 즉

신뢰성 문제 등의 단점을 극복할 수 있는 장점과, 구성요소 및 운전조건에 따라 광범위한 냉각 온도범위에 적용할 수 있는 장점을 지니고 있어, 기존 G-M 냉동기 및 스텔링 냉동기의 적용영역에서 이들을 대체할 수 있는 유력한 대안으로 부각되어, 전세계적으로 활발한 연구가 수행되어지고 있다.

1994년 Kanao 등[4]에 의해 고안된 관성관 맥동관냉동기(Inertance tube Pulse Tube Refrigerator, IPTR)는 오리피스 맥동관냉동기의 오리피스를 관성관으로 대체한 방식의 맥동관 냉동기이다.

관성관 맥동관냉동기는 고주파수의 스텔링형 맥동관냉동기에 있어서 맥동관에서 압력과 질량유량의 관계를 관성관을 통해 최적화하여, 오리피스 맥동관냉동기 보다 개선된 성능 및 대용량화가 가능한 장점을 지니고 있다.

관성관 맥동관 냉동기는 압력 파형을 생성하는 압축부와 압축부와 팽창부를 연결하는 연결관, 압축과정에서 발생한 열을 제거하기 위한 고온 열교환기(Afercooler), 다공성 물질로 구성된 재생기(Regenerator), 저온 열교환기, 맥동관(Pulse tube) 및 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.

관성관 맥동관 냉동기에서 저온부는 재생기와 맥동관을 연결하는 저온 열교환기이며, 냉동기의 이론 냉동능력은 일반적으로 맥동관에서 발생하는 압력일(PV work)로 표현되며, 실제 냉동기의 냉동능력은 이론 냉동능력으로부터 각종 손실을 배제하여 고려하여야 한다.

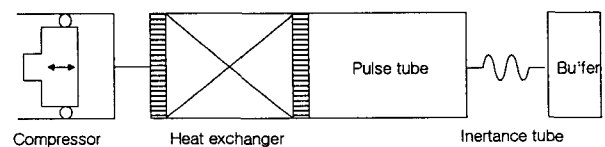


Fig. 1 Schematic diagram of IPTR

Zhu 등[5]은 관성관 맥동관 냉동기에서 관성관의 길이 및 직경의 변화가 맥동관 내의 질량유량과 압력파형에 미치는 영향에 대해 해석을 수행하여, 관성관이 오리피스에 비해 더 큰 위상조절효과가 있음을 제시한 바 있다.

Roach 등[6]은 전기회로 유사해석을 통해 관성관과 맥동관냉동기의 체적과의 상관성을 제시한 바 있다. Boer [7]는 충전압력, 운전주파수, 관성관 및 맥동관의 체적, 재생기 유동특성 등의 인자가 관성관 맥동관냉동기의 이상적인 냉동능력에 미치는 영향에 대해 고찰한 바 있다.

본 연구에서는 관성관이 관성관 맥동관냉동기의 성능에 미치는 영향을 고찰하고, 이를 통해 최적의 관성관을 도출하는 것을 목적으로, 관성관 맥동관냉동기의 D. Gedeon에 의해 개발된 SAGE[8] 프로그램을 활용하여 해석을 수행하였다.

2. 본 론

수 십 Hz 이상의 고주파수로 운전되는 선형 압축기(linear compressor)에 의해 구동되는 관성관 맥동관냉동기는 선형압축기의 운전조건에 의해 큰 성능의 변화가 초래된다.

선형압축기의 운전조건은 주로 공진주파수와 부합여부에 따라 크게 영향을 받으며, 선형압축기의 공진주파수(resonance frequency)는 압축기의 기계적 스프링(coil or flexure spring) 및 충전압력에 따른 가스스프링(gas spring) 효과에 의해서 결정된다.

따라서 선형압축기에 의해 구동되는 맥동관냉동기에서 냉동에 필요한 최소한의 압력비를 얻기 위해서는 맥동관냉동기와 선형압축기와의 조화가 요구되며, 이는 맥동관냉동기의 체적 역시 선형압축기의 특성에 의해 제한됨을 의미한다.

표 1은 해석에서 고려하고 있는 맥동관냉동기의 구성요소의 사양을 나타낸다. 이때 선형압축기의 행정체적(swept volume)은 일정한 것으로 가정하였다.

Table 1. Parameters of analysis

Item	Value	
Compressor	swept volume	9.7 cc
	operating frequency	50 Hz
	charging pressure	2.0 MPa
	working fluid	Helium (Ideal gas)
	source temperature	300 K
Split tube	length	20 cm
	diameter	4 mm
Regenerator	length	8 cm
	diameter	16 mm
	porosity	0.68
	cold end temperature	80 K
Pulse tube	length	8 cm
	diameter	9 mm
Inertance tube	length	1.0 - 3.0 m
	diameter	1.0 - 3.0 mm
Buffer volume	300 cc	

선형압축기의 구동피스톤과 실린더 사이에서는 필연적으로 누설이 발생하며, 이는 압축기의 성능에 부정적인 영향을 미친다. 본 해석에서는 이를 고려하기 위해 압축기 피스톤과 실린더 사이에 일정한 간극을 설정하였다.

한편 연결관은 일반적으로 맥동관냉동기의 경우 저온부를 주위로부터의 열침입으로부터 차단하기 위해 진공용기가 사용되어지고, 압축기로부터 공급되는 작동유체의 충분한 방열을 위해 긴 연결관이 사용되어짐을 고려하여, 20 cm의 길이로 설정하였다.

재생기 및 맥동관의 체적은 Radebaugh[9] 및 Ju[10]가 제시한 압축기 행정체적과의 비율을 고려하여 선정하였다.

Fig. 2는 관성관 맥동관냉동기의 SAGE 해

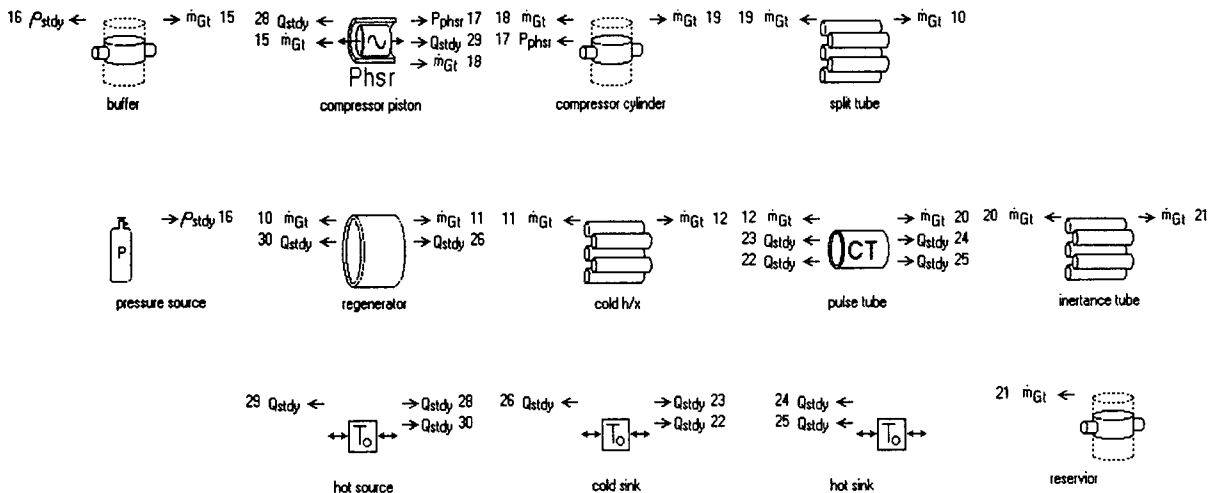


Fig. 2 The analysis model of IPTR (SAGE)

석 모델을 나타낸다.

해석모형은 압축기의 버퍼공간(buffer)과 압축피스톤 및 실린더 라이닝(compressor piston), 압축공간(compressor cylinder), 연결관(split tube), 재생기(regenerator), 저온열교환기(cold h/x), 맥동관(pulse tube), 관성관(inertance tube), 저장소(reservior), 충전압력을 설정하기 위한 압력원천요소(pressure source), 그리고 부가적인 손실을 고려하기 위한 고온 원천요소(hot source), cold sink, hot sink로 구성하였다. 여기서 각각의 구성요소는 내부적인 열교환기 등의 교체요소와 작동유체로 구성되어 있다.

해석시 재생기와 맥동관에서 선형적인 온도구배가 발생하는 것으로 가정하였다.

Fig. 3은 관성관 직경 2 mm, 길이 2 m에 대한 해석결과로, 맥동관 내에서의 압력 및 질량유량을 나타낸 그림이다. 맥동관 내에서의 질량유량은 맥동관의 저온부 즉 저온열교환기 측이 관성관 측보다 더 크게 나타나고, 두 질량유량 사이에는 위상차가 존재함을 알 수 있다.

해석결과는 맥동관 내에서의 압력비가 1.226으로, 맥동관에서의 압력 진폭은 압축기의 압력 진폭의 0.5507배로 나타나, 재생기에 의한 압력강하 뿐만 아니라 관성관에서 압력강하가 크게 발생함을 알 수 있다.

이 경우 냉동능력 6.308 W (이론 냉동능력 6.43 W), PV 입력(PV work) 198 W(COP 3.18%, specific power 31.4 W/W), 압축기로부터의 엔탈피유속(enthalpy flow)은 161.2 W이다. 따라서 압축기에서 압축된 작동유체는 압축기 구조물과의 열교환을 통해 36.8 W의 열을 방출하는 것으로 나타났다. 이는 선형압축기의 모터 구조에 의한 방열을 고려하지 않았기 때문에, 이를 고려한다면 선형압축기의 입력전력은 250W를 상회하고(선형압축기의 운전효율을 80%로 가정할 때), 이때 압축기에서의 방열량은 80W 이상이 되는 것으로 예측된다.

한편 압축기의 간극을 통해 누설되는 질량유량은 압축기로부터 냉동기로 공급되는 질량유량의 1% 수준으로 나타났다.

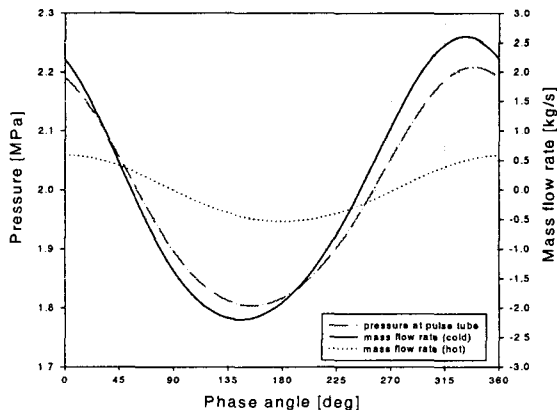


Fig. 3. Calculated mass flow rates and pressure at the pulse tube

Fig. 4 및 5는 관성관의 직경이 2 mm인 경우, 관성관 길이의 변화에 따른 맥동관냉동기의 성능변화를 나타내고 있다. 해석결과 맥동관냉동기의 냉동능력은 관성관의 길이가 1.75 m 부근에서 최대 6.5 W (이론냉동능력 6.623 W)로 나타나나, COP는 관성관 길이 2.25 m 부근에서 최대 3.19%로 예측되었으나, 2 m 부근의 관성관 길이 영역에서는 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 예측되었다. 이는 PV 입력의 변화로 인한 것으로 관성관의 길이가 증가함에 따라 PV 입력이 감소하기 때문이다.

맥동관에서 발생하는 압력 진폭 즉 압력비(최대압력/최소압력)는 약 1.2로 나타났으며, 관성관의 길이가 증가함에 따라 커지며, 압축기에서 발생하는 압력파형과의 비율 역시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 관성관의 길이가 증가함에 따라 재생기 저온부에서의 작동유체 질량유량이 감소하여 재생기에서 발생하는 압력강하보다는 관성관으로 인한 압력강하가 더 크게 발생하기 때문이다. 한편 압축기에서 발생하는 압력파형의 진폭은 관성관 길이 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 압축기 실린더내의 작동유체의 압축열로 인한 방열량 역시 감소하는 것으로 나타났다.

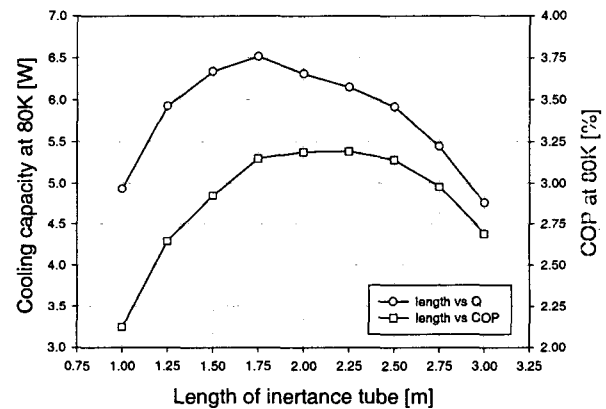


Fig. 4. The COP and cooling capacity as a function of length of the inertance tube

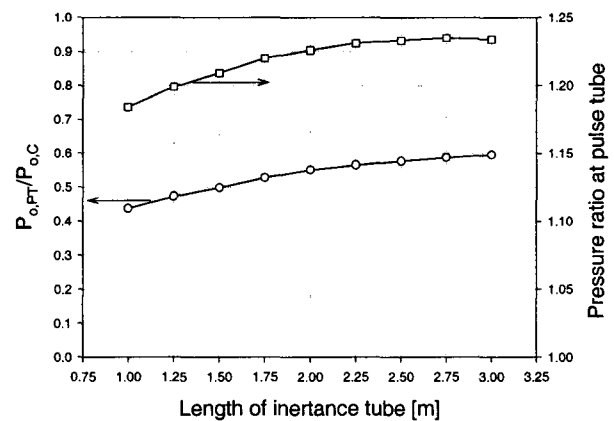


Fig. 5. The non - dimensional pressure amplitude and pressure ratio at the pulse tube

Fig. 6 및 7은 관성관 길이가 1.75 m의 경우 관성관 직경변화에 따른 맥동관냉동기의 성능 변화를 나타내고 있다. 해석결과 냉동능력은 관성관 직경 변화가 길이 변화시보다 체적변화에 더 큰 영향을 미치는 점을 고려하더라도 관성관의 직경변화에 비해 더 급격한 변화를 나타낼 수 있다. 한편 PV 입력은 관성관의 길이변화와 같이 직경이 증가하는 경우 더 크게 요구됨을 알 수 있다. 이는 관성관의 직경이 작은 경우, 이로 인한 유동저항이 급격히 증가하여, 관성관의 위상조절 기능이 크게 저하되기 때문으로 판단된다. 맥동관에서 발생하는 압력파형의 압력비는 관성관의 직경이 증가함에 따라 감소하며, 압축기에서 발생하는 압력파형과의 비율 역시 감소하는 것으로 나타났다. 이는 관성관의 직경이 증가함에 따라 관성관의 질량유량 및 위상조절 기능이 저하되어, 재생기 저온부에서의 작동유체 질량유량이 크게 증가하여 재생기에서 발생하는 압력강하가 관성관으로 인한 압력강하 보다 더 크게 발생하기 때문이다.

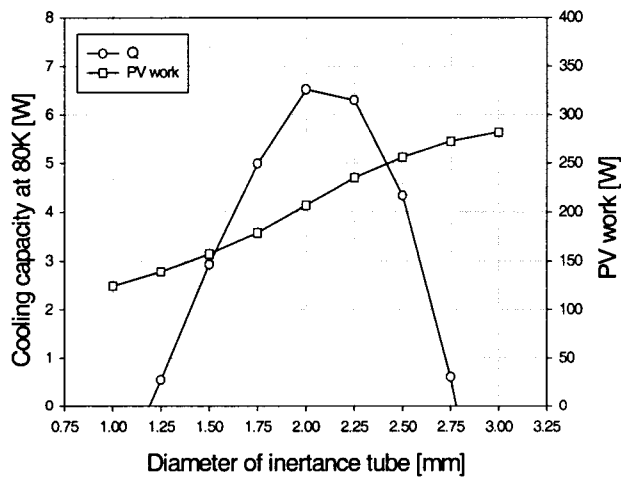


Fig. 6. The PV work and cooling capacity as a function of the diameter of the inertance tube

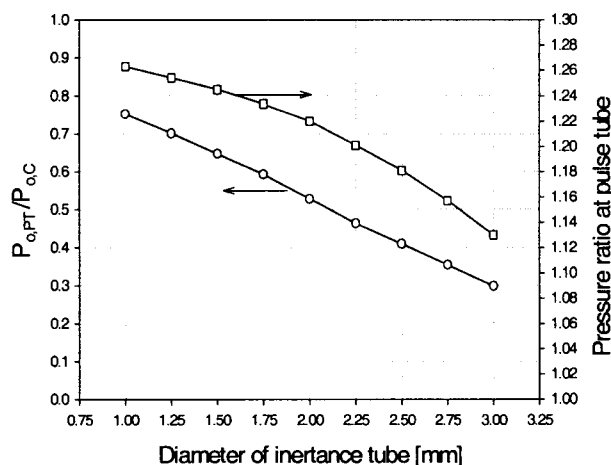


Fig. 7. The non - dimensional pressure amplitude and pressure ratio at the pulse tube

3. 결 론

관성관이 관성관 맥동관냉동기의 성능에 미치는 영향을 고찰하고, 이를 통해 최적의 관성관을 도출하는 것을 목적으로, 관성관 맥동관냉동기의 성능해석을 수행하였다. 해석결과 관성관의 길이 및 직경의 변화는 맥동관냉동기의 성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있으며, 관성관 맥동관냉동기의 실제적인 성능을 파악하기 위해서는 선형압축기의 운전특성의 고려가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] Gifford W. E. and Longworth. R.C. Pulse tube refrigeration, Trans. ASME. J. of Eng. for Industry, 63-WA-210, 1964
- [2] Mikulin, E. I., Tarasov, A. A. and Shkebyonock, M. P., Low temperature pulse tube refrigeration, Adv. in Cryogenic Engineering, Vol. 29, pp. 629-637, 1984
- [3] Radebaugh, R., Zimmerman, D. R. and Lpuie, 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] Kanao K, Watanabe N, Kanazawa Y., A miniature pulse tube refrigerator for temperature below 100K, Cryogenics 34(ICEC Suppl.), pp. 167-170, 1994
- [5] S. W. Zhu, S. L. Zhou, N. Yoshimura and Y. Matsubara, Phase shift effect of the long neck tube for the pulse tube refrigerator, Cryocoolers 9, pp. 269-278, 1997
- [6] Roach PR, Kashani A., Pulse tube cooler with an inertance tube : theory, modeling and practice, Adv. in cryogenic engineering, Vol. 43, pp. 895 - 902, 1996
- [7] P. C. T. de Boer, Performance of the inertance pulse tube, Cryogenics 42, pp. 209-221, 2002
- [8] Dacid Gedeon, SAGE User's Guide, Gedeon Associates, 1999
- [9] Radebaugh, R., Foundations of cryocoolers, One-day short course held at MIT, Cambridge, Masschusetts, 2002
- [10] Y. L. Ju, K. Yuan, Y. K. Hou, W. Jing, J. T. Liang, Y. Zhou, System design of 60K Stirling-type coaxial pulse tube coolers for HTS RF filters, Pycica C 386, pp. 540-543, 2003