

Three Buffer 맥동관 냉동기에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of a Three Buffer Pulse Tube Refrigerator

박성제*, 고득용**, 김효봉***, 신완순[#]

S.J. Park*, D.Y. Koh**, H.B. Kim***, W.S. Shin[#]

Abstract: An experimental study was carried out to improve the cooling capacity and performance of the pulse tube refrigerator. Three buffer pulse tube refrigerator was designed and fabricated, and the experimental apparatus was constructed. This paper presents operating process of the three buffer pulse tube refrigerator and results obtained with the performance test. The cooldown characteristics and load characteristics are described. The lowest temperature measured in the three buffer pulse tube refrigerator was 88K and the cooling capacity at the optimum operating condition was 27W at 120K.

Key Words: regenerator, cooling capacity, pulse tube refrigerator, buffer, no load temperature

1. 서 론

소형 극저온 냉동기술은 최근의 초전도 기술의 발전과 더불어 중요성이 점점 높아지고 있다. 현재 상업적으로 활발히 이용되고 있는 소형 극저온 냉동기로는 스티어링(Stirling) 냉동기와 Gifford-McMahon 냉동기 등이 있는데 팽창기의 왕복기 저온부에 구동부가 존재하여 저온단에서 진동을 유발하고 마찰과 shuttle 열손실을 일으키는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 최근에 활발히 연구가 진행되고 있는 맥동관 냉동기는 팽창기의 저온부에 구동장치가 없어서 다른 극저온 냉동기보다 간단한 구조와 저진동으로 높은 신뢰성, 운전·보수의 용이성과 저렴한 비용 등의 장점을 가지고 있다¹⁾.

맥동관 냉동기의 개념은 1963년에 W.E. Gifford와 R.C.Longsworth가 도입²⁾한 이래로 1980년대 말부터 오리피스 맥동관 냉동기, 이중관 맥동관 냉동기³⁾ 등 여러 가지 유형의 맥동관 냉동기가 개발되어 효율이 크게 향상되었다. 이러한 맥동관 냉동기는 밸브의 유무에 따라 구분 되는데 밸브에 의해 고·저압을

발생하는 형식을 Gifford-McMahon(GM) type이라고 하고, 밸브없이 고·저압을 발생 시키는 형식을 Stirling type이라고 한다. GM type은 Stirling type에 비해 열역학적 효율과 공간효율이 떨어지지만, 압축부의 진동이 저온부에 연결되지 않아 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 대용량이 가능하기 때문에 많은 응용 분야에 적용 되리라 기대된다.

그런데 기존의 GM type 맥동관 냉동기는 고저압 밸브가 열렸을 때 맥동관내의 압력과 많은 차이가 있다. 이 과정은 재생기와 맥동관의 사용적(Dead Volume)에 기인하며, 밸브의 개구 면적을 크게 하여도 감소시킬 수 없는 비가역 손실을 발생 시킨다. 이러한 손실을 제거하고 효율을 높이고자 1997년 중국의 Zhu, S.W.등은 Multiple Buffer(Active-Buffer) Pulse Tube Refrigerator(MBPTR or ABPTR)를 소개하여 많은 성과를 올렸다^{4,5,6)}. MBPTR의 기본적인 개념은 맥동관의 고온측에 2개 이상의 버퍼(Buffer)를 설치하여 고압밸브와 저압밸브에서의 압력손실을 감소시키는 것이다. 이러한 개념은 실험으로 입증되었는데, Zhu, S.W.등에 의하면 80K에서 약 160W의 냉동능력을 얻어 카르노 효율의 약 11%가 얻어 졌다.

따라서 본 연구에서는 맥동관 냉동기의 고효율화를 위하여 기초연구로서 다중 버퍼(Multiple buffer)형 맥동관 냉동기를 설계, 제작하여 기본실험을 통해 소형 재생형 극저온 냉동기의 대용량화에 대한 가능성을 타진해 보고, 인체 및 환경에 유해한 휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds)의 저온 응축회수에 활용하고자 한다.

2. 다중 버퍼 맥동관 냉동기의 작동과정

Fig. 1은 n 버퍼를 가진 다중 버퍼 맥동관 냉동기(Multiple buffer pulse tube refrigerator, MBPTR)의 개략도를 보여주고 있다. MBPTR은 재생기, 고온 열교환기, 맥동관, 저온 열교환기, 고압밸브(V_H), 저압밸브(V_L), On/Off 밸브 V_i ($i=1,2,\dots,n$)와 n 버퍼들로 이루어져 있다. 밸브 V_H 는 압축기의 고압측에 연결되어 있고, 밸브 V_L 는 압축기의 저압측에 연결되어 있다. 버퍼에서의 가스들은 $V_1 - V_n$ 밸브들의 개폐에 의해 왕복한다.

Fig. 2(a), (b)는 이중 버퍼(Two Buffer)와 3중 버퍼(Three buffer)형태의 전형적인 밸브 타이밍을 보여주고 있다. 이 그림에서 굵은 선은 밸브가 열린 것을 의미한다. GM 형태의 맥동관 냉동기의 압축기는 일정한 고압의 가스를 맥동관으로 공급한다. 압축기로부터 맥동관으로 들어간 가스는 단열적으로 팽창

* 정 회 원 : 한국기계연구원 선임연구원

** 정 회 원 : 한국기계연구원 선임연구원

*** 비 회 원 : 한국기계연구원 주임기능원

[#] 비 회 원 : 충남대학교 박사과정

원고접수 : 1999년 4월 21일

심사완료 : 1999년 6월 21일

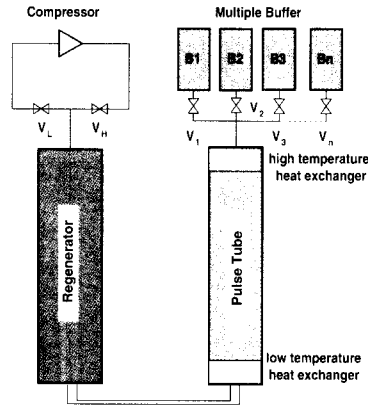
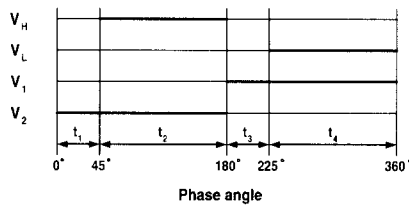
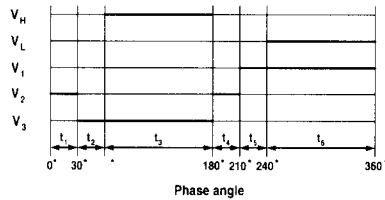


그림 1 n 버퍼를 가진 MBPTR의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of MBPTR



(a) Two buffer type



(b) Three buffer type

그림 2 밸브 타이밍 (a) 2중 버퍼 (b) 3중 버퍼
Fig. 2. Valve timing of typical MBPTR

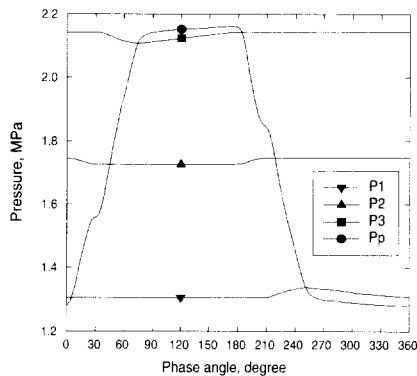


그림 3 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 압력변화
Fig. 3. Typical pressure wave of three buffer pulse tube refrigerator

하여 압력이 낮아지고 일정한 압력을 유지하며 나간다. 이러한 조건에서는 이상적인 Solvay 냉동기와 유사하다. MBPTR의 중요한 점은 버퍼의 가스가 맥동관의

압력을 고압밸브가 열리기 전에 고압 가까이까지 증가시키고, 고압밸브가 닫힌 후에 맥동관의 가스는 단열적으로 저압 가까이까지 팽창한 뒤 저압밸브는 열린다. 따라서 고저압 밸브를 통한 비가역 손실은 기존의 맥동관 냉동기에 비해 상당히 감소한다.

Fig. 3 은 3중 버퍼 맥동관 냉동기에서의 전형적인 압력파형을 보여준다. 버퍼 3(P_3), 버퍼 2(P_2)와 버퍼 1(P_1)에서의 압력은 각각 고압, 중간압, 저압으로서 거의 일정하고, P_p 는 맥동관내의 압력이다.

3. 실험장치 및 실험결과

3.1 3중 버퍼 맥동관 냉동기

Fig. 4 는 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 개념도를 보여주고 있다. 3중 버퍼 맥동관 냉동기는 압축기, 재생기, 맥동관, 밸브와 3개의 버퍼 등으로 구성되어 기존의 맥동관 냉동기에 비해 고압, 저압 밸브에서의 압력 손실을 최소화하는 구조로 되어 있다. 헬륨압축기는 크라이오 펌프용 압축기(Balzer사)를 사용하였으며, 이 압축기의 헬륨충전압력은 16기압이고, 작동시 압력은 최고 21기압과 최저 6기압 사이에서 작동한다. 맥동관내의 압력파를 발생시키기 위한 밸브의 개폐 조절은 타이머(Omron사)로 제어하여 맥동관내 압력파의 주파수 및 고저압 개폐 타이밍을 조절할 수 있도록 하였고, V_{H1} , V_{L1} , V_1 , V_2 와 V_3 는 C_v 값이 0.31인 솔레노이드 밸브를 사용하였다.

재생기 내부의 축냉재는 온도별 축냉 효율을 높이기 위해 고온부에 황동 메쉬(mesh), 저온부에 납으로 된 작은 구슬(Pb ball)을 채웠다. 맥동관은 관내의 유동을 층류유동이 되도록 하기 위하여 관내면을 메쉬 #1,500인 사포로 닦은 뒤 실험을 수행하였다. 맥동관과 재생기 사이에는 황동 메쉬(#200, 20장)를 설치하여 맥동관내로 들어가는 가스의 유동을 균일하게 하였다.

Fig. 5는 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 밸브타이밍을 보여주고 있는데, 굵은선은 밸브가 열려있는 시간을 나타낸다. 버퍼 1, 버퍼 2, 버퍼 3, 압축기 고압출구와 압축기 저압입구 등에서의 압력 P_1 , P_2 , P_3 , P_{H1} 와 P_{L1} 은 다음과 같은 관계가 있다. P_3 는 P_{H1} 보다 약간 낮고, P_1 은 P_L 보다 약간 높으며 P_2 는 중간압력이다. 가스유동과 밸브 개폐과정을 살펴보면 V_1 과 V_1 이 닫히고 V_2 가 시간 a_1 에서 열린 후 맥동관의 압력은 버퍼 2로부터의 가스유동으로 인하여 P_2 가 가까이 증가한다. 시간 a_2 에서 V_2 가 닫히고 V_3 가 열리면 맥동관에서의 압력은 버퍼 3로부터의 가스유동으로 인하여 P_3 가 가까이 증가한다. 시간 a_3 에서 V_{H1} 가 열리면 가스는 압축기로부터 재생기를 통한 맥동관으로 유동하며, 버퍼 3으로부터 이동한 맥동관에서의 가스는 버퍼 3으로 돌아간다. 시간 a_4 에서 V_{H1} 와 V_3 가 닫히고 V_2 가 열리면, 맥동관의 압력은 버퍼 2로의 가스유동으로 P_2 가까이 감소한다. 시간 a_5 에서 V_2 가 닫히고 V_1 이 열리면, 맥동관의 압력은 버퍼 1으로의 가스유동으로 인해 P_1 가까이 감소한다. 시간 a_6 에서 V_1 이 열리면, 가스는 맥동관으로부터 재생기를 통해 압축기로 유동하고, 맥동관으로부터 버퍼 1으로의 가스는 맥동관으로 되돌아간다. 시간 a_3 에서 밸브를 통과하는 압력차와 시간 a_6 에서 밸브 V_1 을 가로지르는 압력차는 작기 때문에 손실이 감소하게 된다.

맥동관과 재생기에서의 압력은 a_1 에서 a_3 까지 증가하고 맥동관에서의 가스는 압축되며 재생기 저온부를

통과하여 재생기의 고온부로 향해 유동한다. 맥동관과 재생기에서의 압력은 a_4 에서 a_6 까지 감소하며, 재생기에서의 가스는 팽창하고, 재생기의 저온부를 통과하여 맥동관의 고온부를 향해 유동한다. 이리하여 재생기 손실은 감소된다.

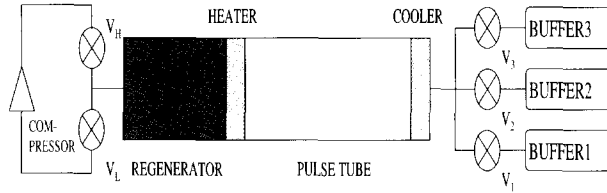


그림 4 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 개략도
Fig. 4. Three buffer pulse tube refrigerator

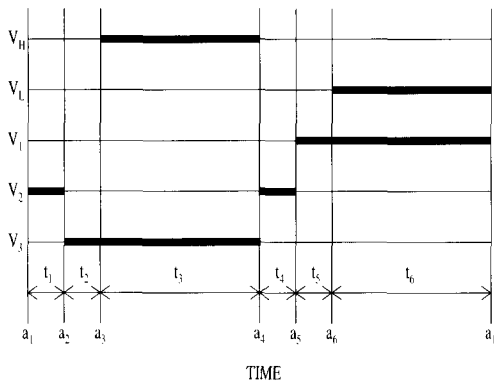


그림 5 3중 버퍼 맥동관 냉동기의밸브 타이밍
Fig. 5. Valve timing of three buffer pulse tube refrigerator

3.2 실험장치 및 실험방법

3중 버퍼 맥동관 냉동기 성능시험장치의 개략도는 Fig. 6과 같다. 이 실험에 사용된 진공용기는 길이 800mm, 내경 300mm, 두께 5mm의 스테인레스강을 사용하였고, 재생기는 내경 35mm, 길이 200mm, 두께 1mm의 스테인레스 관을 사용하였으며, 맥동관은 내경 31mm, 길이 350mm, 두께 0.38mm의 스테인레스 관을 사용하였다. 각 버퍼의 체적은 $1,000\text{cm}^3$ 이었다.

진공플랜지에 연결된 맥동관과 재생기에 부착된 불순물을 제거하기 위하여 먼저 충분히 세척한 다음 맥동관과 재생기의 저온부에 온도센서와 히터 와이어(heater wire)를 부착하고, 진공용기 외벽으로부터의 복사 열손실을 방지하기 위하여 super insulation을 수십겹 감은 뒤, 저온부를 진공용기속에 넣는다. 3중 버퍼 맥동관 냉동기와 조립된 진공용기는 로타리 진공펌프와 오일 확산(diffusion) 펌프를 사용하여 약 10^{-5}Torr 의 진공도를 유지함으로써 대류에 의한 열손실을 방지하였다.

온도는 silicon-diode 센서를 재생기 및 맥동관 저온부에 부착하여 측정하였고, 압력은 재생기 입구, 맥동관 고온부와 3개의 버퍼에 스트레인게이지형 압력센서를 부착하여 측정하였다. 그리고 맥동관 저온부의 순수냉동능력 측정 및 온도조절을 위하여 망가닌 히터 와이어를 맥동관의 저온 열교환기 주위에 일정한 저항

만큼 감고 망가닌선에 전류를 흘려 일정온도가 유지될 때 전류 및 전압을 측정하여 냉동능력으로 환산하였다.

맥동관 냉동기는 냉매로 고순도의 헬륨을 사용하고 있으며, 냉동온도가 극저온 영역이므로 냉동기 내부에 불순물이 존재하면 이 불순물이 냉동기의 냉매 유로에 얼어 붙음으로써 냉동기의 성능에 치명적인 악영향을 미치게 된다. 따라서 3중 버퍼 맥동관 냉동기를 압축기와 연결하기 전에 재생기 내부의 수분이나 불순물을 제거하기 위하여 진공펌프로 재생기 내부를 진공 상태로 함으로써 내부 온도가 포화온도 이상이 되도록 하

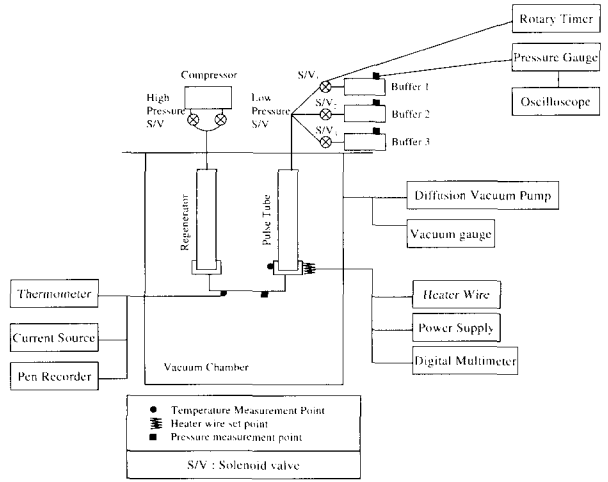


그림 6 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 실험장치 개략도
Fig. 6. Experimental apparatus of three buffer pulse tube refrigerator

여 수분을 증발 시키고 냉동기 입구밸브와 헬륨 용기를 연결하여 헬륨가스를 5kgf/cm^2 정도의 압력으로 공급하면서 약 5분간 출구밸브를 일정한 시간 간격으로 여닫아서 불순물을 제거하였다. 이와 같은 과정을 여러번 되풀이 하여 재생기 내부의 불순물을 충분히 제거한 후, 압축기에 정상상태압력으로 헬륨가스를 충전하고 밸브의 개폐를 조절함으로써 냉동기를 구동한다.

3중 버퍼 맥동관 냉동기의 성능시험은 타이머에 연결된 5개의 솔레노이드의 밸브를 이용하여 작동주파수 및 재생기 고·저압, 버퍼의 고압·중간압·저압 밸브의 개폐지속시간을 조절하여 맥동관 저온 열교환기의 온도와 재생기 고온부 및 각 버퍼의 압력변화를 측정하여 최적작동조건을 도출하고, 맥동관 저온 열교환기에서의 온도에 따른 냉동능력을 측정하였다.

작동조건은 밸브 타이밍에 의해 조절되는데, 밸브 타이밍을 조절하기 위하여 두가지 변수들을 사용하였다. 하나는 한 주기의 음의 시간 비율에 대한 양의 시간 비율인데, 예를 들면 (45:55)는 음의 시간 비율이 45%이고, 양의 시간 비율은 55%인 것을 의미한다. 즉, 음의 시간($t_4+t_5+t_6$)에 대한 양의 시간($t_1+t_2+t_3$)의 한 주기에 대한 시간 비율은 45 : 55라는 것을 나타낸다. $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$ 에대한 정의는 Fig. 5에서 보여준다. 또 다른 하나의 변수는 밸브 타이밍비 (t_1, t_2, t_3)인데, 예를 들면 (0.02, 0.02, 0.21)은 $t_1=0.02\text{sec}, t_2=0.02\text{sec}, t_3=0.21\text{sec}$ 이고 작동주파수는 2Hz인 것을 의미한다. 실험에서 양과 음의 반주기가 같은 밸브타이밍비를 가지도록 하였다.

3.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 7은 작동주파수 2Hz, 반주기 시간비율 (50:50), 밸브 타이밍비 (0.02, 0.02, 0.21)로 하였을 때 맥동관 저온부의 cooldown 특성을 보여준다. 약 60분이 지난 후 온도가 안정되기 시작하였으며, 최저도달온도 91.1K 까지 도달하는데 약 135분이 소요되었다. 본 실험에 사용된 맥동관 냉동기는 VOC의 응축을 위해 응축기의 열교환을 위한 향류 열교환기와 VOC 분리기(separator) 등의 장치가 부착되어 있기 때문에 열용량과 열손실이 매우 커서 예상한 것 보다 도달온도가 높고, 최저도달온도시간이 길게 나타났다.

Fig. 8은 작동주파수 2Hz 일 때 반주기 시간비율을 (50:50), (42:58)로 변경하고, 밸브 타이밍비를 여러 가지로 변경하였을 때의 최저도달온도분포를 보여준다. 양의 반주기가 감소할 때 최저도달온도는 낮아지는 경향을 보이고 있으며, t_2 가 영에 가까울수록 최저도달온도는 낮아지고 있다. 실험결과에서는 $t_2=0$ 일 때 좋은 결과를 보였지만 다중 버퍼 맥동관 냉동기의 해석 이론을 고려할 때 t_2 가 영일 때 보다는 영에 아주 가까울 때 더 좋은 성능을 보일 것으로 판단된다. 이러한 경향은 t_3 의 시간이 길어지는 것과 상관관계가 높을 것이라는 것을 예상할 수 있다.

또한 t_1 보다는 t_2 의 시간이 성능에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 즉, t_2 가 0.01과 영일 때 각각 비슷한 온도를 보여주고 있으며, t_1 의 변화에 대해서는 큰 영향을 미치지 않는다. 이것은 재생기 고온부에서의 고·저압 밸브의 압력손실은 압력 증가시에 재생기내 압력이 저압에서 중간압까지와 압력 감소시에 재생기내 압력이 고압에서 중간압 까지에서 크게 작용한다는 것을 예측할 수 있다.

Fig. 9는 반주기 시간비율 (50:50)이고, 작동주파수를 1.5Hz, 2.5Hz, 3Hz로 바꿀 때 밸브타이밍비에 따른 최저도달온도의 변화를 보여준다. 작동주파수가 감소함에 따라 최저도달온도가 감소하고 있으며, Fig. 8의 결과와 비슷하게 t_2 가 감소함에 따라 최저도달온도가 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 10은 작동주파수에 따른 최저도달온도분포를 보여주고 있다. 작동주파수 2Hz일 때 최저도달온도가 88K로서 가장 낮게 측정되었다. 따라서 최적 작동주파수는 2Hz인 것으로 판단된다.

Fig. 11은 작동주파수에 따른 재생기 고온부의 고·저압 및 각 버퍼들에서의 압력변화를 보여주고 있다. 작동주파수가 증가함에 따라 재생기 고온부의 압력진폭은 감소하고 있으며, 이에 따라 버퍼 3의 압력은 감소하고, 버퍼 1의 압력은 증가하고 있다.

그리고 버퍼 1의 압력은 완만하게 상승하고 있으나 큰 변화는 없다. 또한 재생기 고온부의 고압과 버퍼 3의 압력차는 약 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고, 재생기 고온부의 저압과 버퍼 1의 압력차는 약 $2\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 측정되었다.

Fig. 12는 작동주파수 2Hz이고, 반주기시간비율 (50:50), 밸브타이밍비 (0.02, 0.01, 0.22)일 때 맥동관 저온부에서의 실제냉동능력을 보여준다. 최저도달온도는 88K 이었으며, 129K에서 27W의 냉동능력이 측정되었다. 본 실험장치에는 맥동관 저온부에 향류 열교환기와 VOC 분리기 등이 부착되어 있기 때문에 부속장치들의 열용량과 전도, 복사 열손실로 인해 예상보다 냉동능력이 적게 나왔지만 전도와 복사 열손실을 차단하기 위한 개선과 재생기 고온부에서의 고·저압 밸브를 높은 C_v 값으로 변경하면 더욱 좋은 결과가 예상된다.

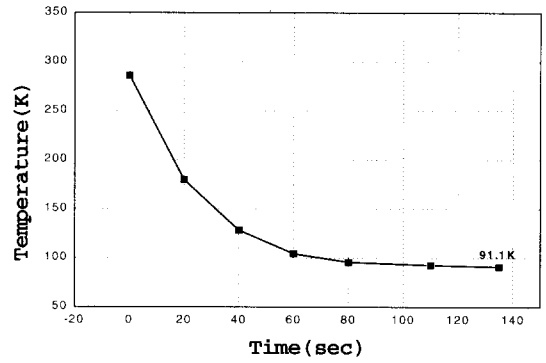


그림 7 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 냉각 특성

Fig. 7. The cooldown characteristics of three buffer pulse tube refrigerator

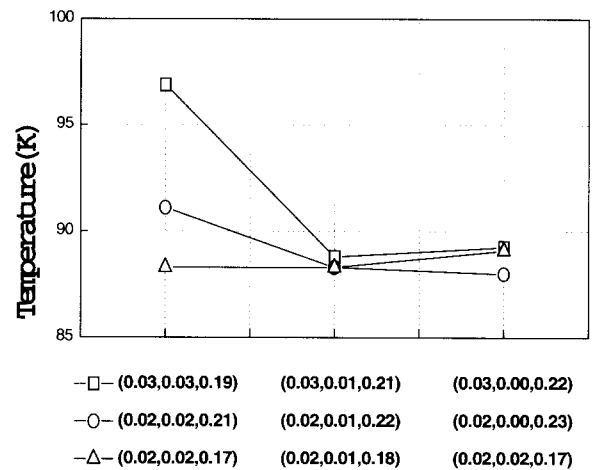


그림 8 반주기 시간비율과 밸브 타이밍에 따른 최저도달온도 변화

Fig. 8. No load temperature as a function of half period time ratio and valve timing

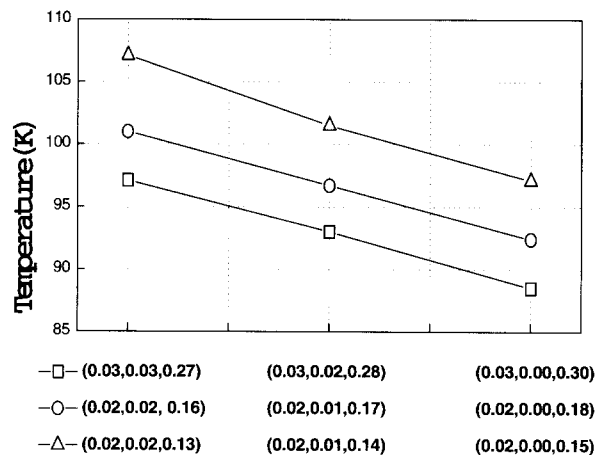


그림 9 작동주파수와 밸브 타이밍에 따른 최저도달온도 변화

Fig. 9. No load temperature as a function of operating frequency and valve timing

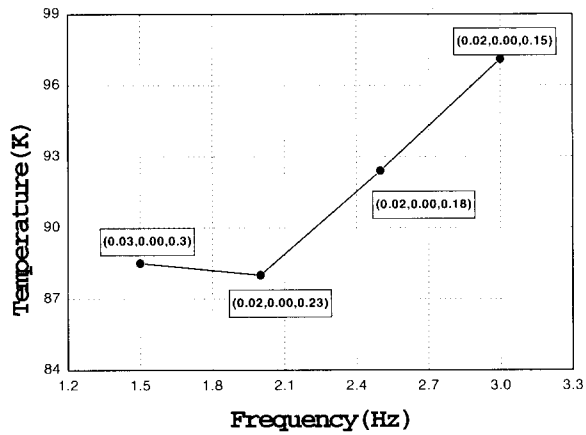


그림 10 작동주파수에 따른 최저도달온도 변화
 Fig. 10. No load temperature as a function of operating frequency

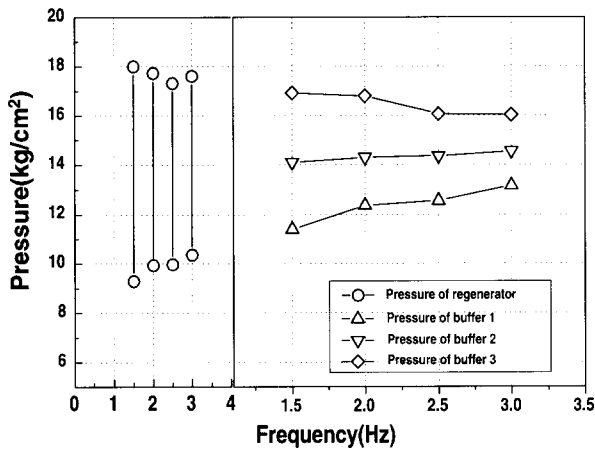


그림 11 작동주파수에 따른 압력변화
 Fig. 11. Pressure variation as a function of operating frequency

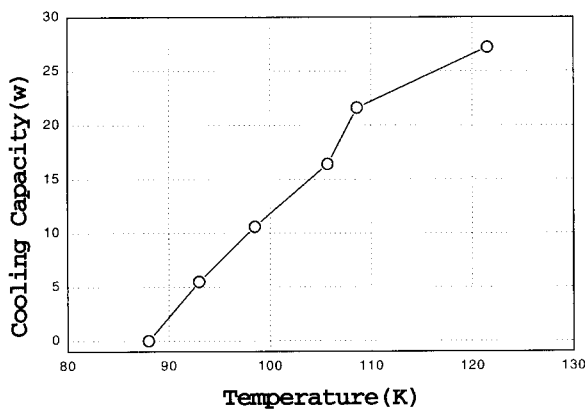


그림 12 3중 맥동관 냉동기의 냉동능력
 Fig. 12. Load characteristics of three buffer pulse tube refrigerator

4. 결 론

이상과 같이 3중 버퍼 맥동관 냉동기를 설계, 제작하여 냉각특성과 최적작동조건 및 냉동능력에 관한 성능실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 3중 버퍼 맥동관 냉동기는 작동 후 약 60분이 지난 후 온도가 안정되기 시작하여 최저도달온도 91.1K 까지 도달하는데 약 135분이 소요 되었다. 이것은 맥동관 저온부에 부가장치가 부착되어 있어 도달 온도가 높고, 최저온도 도달시간이 길게 나타난 결과이다.

(2) 반주기 시간비율에서 양의 반주기가 감소할 때 최저도달온도가 낮아졌으며, t_1 보다는 t_2 의 시간에 의해 성능이 크게 좌우된다.

(3) 작동주파수가 증가함에 따라 재생기 고온부의 압력진폭은 감소하였으며, 버퍼 3의 압력은 감소하고, 버퍼 1의 압력은 증가하였다.

(4) 3중 버퍼 맥동관 냉동기의 최적작동주파수는 2Hz이었고 맥동관 저온부에서의 최저도달온도는 88K이었으며, 실제냉동능력은 120K에서 27W이었다.

참 고 문 헌

- [1] Thomas, M.F., "Cryogenic Engineering" Marcel Dekker, Inc., 1997
- [2] Gifford W.E and Longworth, R.C., "Pulse Tube Refrigeration", Trans. ASME, J. Eng. Ind. 86 : 264., 1964
- [3] Zhu, S., Wu, P., and Chen, Z., "Double Inlet Pulse Tube Refrigerators : an important improvement", Cryogenics, Vol. 30, p.514, 1990
- [4] Zhu, S., Matsubara, Y., "Proposal for a Tube Expander", Cryogenics, Vol. 36, p.403, 1996
- [5] Kakimi, Y., et. al., "Pulse Tube Refrigerator and Nitrogen Liquifier with Active Buffer System", Proc. of 9th Int. Cryocooler Conf., p.247, 1996
- [6] Zhu, S., Kakimi, Y. and Matsubara, Y., "Investigation of Active Buffer Pulse Tube Refrigerator", Cryogenics, Vol. 37, p.461, 1997

저 자 소 개



박성제 (朴聖濟)

1962년 12월 13일 생, 1985년 부산대학교 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 선임연구원



고득용 (高得龍)

1959년 2월 12일생, 1982년 한양대학교 공대 기계공학과 졸업, 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 한국기계연구원 선임연구원



김효봉 (金孝烽)

1960년 4월 10일 생, 1987년 한국기계연구원 FIC 기계공학과 졸업, 현재 한국기계연구원 주임기능원



신완순 (申完淳)

1973년 9월 20일 생, 1996년 충남대학교 공대 기계공학과 졸업, 1998년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정