

## 4 밸브형 맥동관 냉동기의 사이클 해석

조경철\*·이상원\*·임영현\*·김수연\*\*·정평석\*\*

### The Cycle Analysis of 4 Valve-type Pulse Tube Refrigerator

Kyung-Chul Cho, Sang-Won Lee, Young-Hun Lim,  
Soo-Yun Kim and Pyung-Suk Jung

**Key Words:** Pulse Tube Refrigerator (맥동관 냉동기), Regenerator (재생기), Cycle analysis (사이클 해석), Cryocooler (극저온 냉동기)

#### Abstract

In this paper, we constructed four valve type pulse tube refrigerator and found the characteristic of orifice (needle valve) opening for using phase shifter and optimum cycle time. The valve timing was controlled by the digital timers. The experimental results showed the optimum frequency and cycle time at operating conditions. The results showed that the optimum process time existed and the rate was same at each operating frequency. The no-load temperature of the refrigerator was 85K.

#### 기호 설명

$T_{cycle}$  : Cycle time [sec]  
 $t$  : Process time [sec]  
 $\tau$  : Process time per Cycle time

#### 하첨자

- 1 : Pressure build up process
- 2 : Intake process
- 3 : Volume increase process
- 4 : Expansion process
- 5 : Exhaust process

#### 1. 서론

120K 보다 낮은 온도에서 작동하는 소형 냉동기로는 Stirling, Vuilleumier, Solvay, 와 Gifford - McMahon 극저온 냉동기들이 개발, 사용 되었으나 제한된 수명과 관리, 유지에 드는 많은 시간과 비용을 요구 해왔다.<sup>(1-4)</sup> 이와 같은 단점을 보완한 냉동기가 맥동관 냉동기로서 팽창부의 왕복기 대신 가스 피스톤에 의해 냉동을 발생하여 진동과 소음문제는 물론이고, 부가적인 열손실 요소를 제거함으로써 신뢰성과 수명이 향상되었다. 기본적인 맥동관 냉동기는 1963년 Gifford 와 Longsworth에 의하여 처음 고안되었다.<sup>(5)</sup> 이들이 만든 기본형 맥동관 냉동기(basic pulse tube cryocooler)는 효율이 낮고 냉동용량이 작아서 다른 저온 냉동기에 비해 많은

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원. 영남대학교 기계공학부

연구가 이루어지지 않았었다. 1984년 Mikulin에 의하여 고안된 오리피스 맥동관 냉동기(orifice pulse tube cryocooler)에 의하여 상당 부분 해결되었으나<sup>(6)</sup> Stirling 냉동기나 G-M냉동기에 비하여 냉동용량이 여전히 작았다. 이러한 문제를 1990년 중국의 Zhu 등에 의해 쌍입구맥동관 냉동기(double inlet orifice pulse tube refrigerator)를 개발하여 기존의 오리피스 맥동관 냉동기의 문제점이었던 작은 단위 질량 유량당 냉동능력 문제를 어느정도 해결하였다.<sup>(7)</sup> 이 후에도 좀더 향상된 맥동관 냉동기를 개발하기 위한 연구는 계속되고 있으며, 대표적으로 일본의 Matsubara 등에 의해 개발된 4밸브 맥동관 냉동기로서 4 밸브의 개폐 시기를 조절하므로써 after cooler와 buffer chamber를 제거한 개선된 맥동관 냉동기이다.<sup>(8, 13)</sup>

본 연구는 최근에 자체 제작된<sup>(14)</sup> 4밸브형 극저온 냉동기의 사이클 해석과 성능실험을 통하여 고효율의 4밸브형 맥동관 냉동기 제작의 기초 자료를 제공 하고자 한다.

## 2. 맥동관 냉동기의 구성 및 제어

### 2.1 작동원리

4밸브 맥동관 냉동기는 맥동류를 발생시키기 위해 압축기, 4 개의 솔레노이드 밸브와 냉열을 저장하는 재생기, 맥동류를 유도하는 맥동관, 두 개의 니들 밸브 구성되어 있다. 4밸브형 맥동관 냉동기의 사이클과정은 Fig. 1에, 밸브 시기는 Table 1에 나타나 있으며 다음과 같다.

1) 1번 밸브(고압밸브, 흡입밸브)와 3번 밸브(고압밸브, 흡입밸브)를 연다. 이때 2번 밸브(저압밸브, 배기밸브)와 4번 밸브(저압밸브, 배기밸브)는 닫혀 있다. 1번 밸브를 통해 들어온 고압가스는 재생기를 지나면서 냉각된 후 가스피스톤이 폐단부에 위치한 채 맥동관 내부로 흡입된다. 이때 고압밸브인 3번 밸브를 통한 고압가스는 니들 밸브의 조절로 유체의 유량을 조절하며 실린더 내에서 압력이 최고압력( $P_H$ )으로 증가하고 가스피스톤의 위치는 맥동관 내의 하단에 위치한다.

2) 1번 밸브를 열어 둔 채 3번 밸브를 닫는다. 실린더 내의 가스피스톤은 cold end에서 hot end로 이동, 즉 가스피스톤이 상사점에 도달할 때까지 피

스톤 하부의 가스는 고압을 유지한 상태에서 가스피스톤에 밀려 4번밸브와 니들 밸브를 지나 실린더 외부로 배출되게 된다. 이 과정 동안 4번 밸브쪽 니들 밸브에 의해 고압은 유지된다.

3) 4번 밸브를 열어둔 채 1번 밸브를 닫는다. 맥동관내의 압력이 감소하고 팽창체적이 증가 한다. 이때 가스피스톤은 실린더 상부에 위치한다.

4) 4번 밸브를 열어둔 채 2번 밸브를 연다. 맥동관 내의 고압가스는 압력이 최저압력( $P_L$ )이 될 때까지 재생기를 지나 2번 밸브를 통해 배출되며, 이때 맥동관 내의 가스는 단열적으로 팽창하고 가스의 온도는 계속 낮아지게 된다. 이 저온의 가스는 외부로 부터 열을 흡수하고, 동시에 재생기를 지나면서 냉열을 저장한다.

5) 2번 밸브를 열어둔 채 4번 밸브를 닫고, 3번 밸브를 통하여 흡입되는 고압가스에 의하여 가스피스톤은 맥동관의 hot end에서 cold end로 이동하게 되고, 맥동관 내의 저온가스는 재생기를 지나면서 냉열을 저장하고 2번 밸브를 통해 배출된다. 이 과정 동안 3번 밸브(고압밸브, 흡입밸브)를 통한 고압가스는 니들 밸브의 조절로 유체유량을 조절하여 압력이 일정하게 유지 되도록 한다.

6) 맥동관 폐단부의 압력이 최저압에 도달하면 1번 밸브를 열고 2번 밸브를 닫는다. 이 때 1번 밸브를 통하여 들어온 고압가스는 재생기까지의 빈 공간을 고압으로 ( $P_H$ ) 채워 가스피스톤의 양단에 고압이 걸리게 된다.

7) 1)의 과정으로 되돌아 간다.

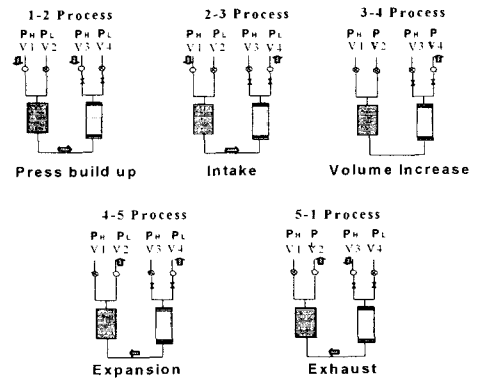


Fig. 1 Sequence of process operation in the 4-valve pulse tube refrigerator.

Table 1 Valve timing

valve step	Valve1	Valve2	Valve3	Valve4
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	OFF	OFF	ON
4	OFF	ON	OFF	ON
5	OFF	ON	ON	OFF

## 2.2 제어원리

Fig. 2 와같이 Digital timer를 조절함으로써 각각의 솔레노이드 밸브 개폐시기를 결정하여 냉동기를 구동하게 된다. 4개의 Solenoid 밸브를 5개의 On-Off로 작동하는 Digital Timer로 조절하였다. 1번 Timer와 3-4번 Timer는 On에서 Off로 위상이 변하고 2번 Timer는 Off에서 On으로 위상이 변한다. 또 Delay Timer와 Cycle Timer는 Pulse를 생성하는 Timer로 작동한다. Timer의 구성은 전체적인 Cycle time을 조절하는 1개의 Cycle Timer와 1번 Solenoid 밸브와 2번 Solenoid 밸브를 조절하는 각각의 Timer, 또 3번과 4번 Solenoid 밸브는 위상이 반대로 작용하므로 1개의 Timer로 작동을 하였다. 그리고 3-4번 Timer는 Timer의 작동 특성상 단 한번의 위상이 변할 수 있다. 그래서 3-4번 Timer를 단 한번의 위상변화만 일어나도록 하기 위해서 또 하나의 Delay Timer를 둔다. 그리고 전체 주파수를 맞추기 위해서 Cycle Timer에서 Reset 신호를 1번 Timer, 2번 Timer, Delay timer에 보냄으로써 전체 작동 주파수를 일정하게 유지한다. 또 3-4번 Timer의 주기는 Delay timer에서 Reset 신호를 보냄으로써 모든 Timer가 단 하나의 Timer, 즉 Cycle timer에 의해서만 작동 오차가 생기도록 하였다.

## 3. 제작 및 실험

### 3.1 맥동관 냉동기의 제작

4밸브 맥동관 냉동기의 성능 및 운전특성을 살펴보기 위하여 Fig. 3 에서 보는 바와 같은 실험장치를 제작하였으며, 시스템은 가스공급부, 재생기, 맥동관, 네 개의 솔레노이드 밸브, 두 개의 니들 밸브, 밸브의 개폐를 제어하기 위한 타이머 그리고 외부

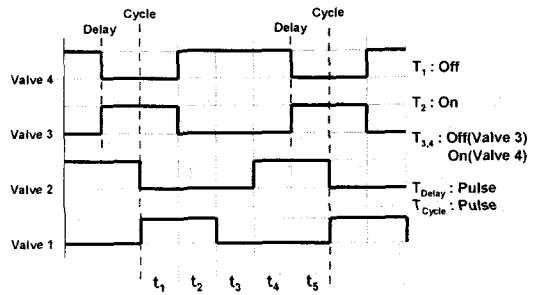


Fig. 2 A typical operation timing for refrigerator with 5 digital timers

와의 단열을 위한 진공장치로 구성되어 있다.

맥동관은 외경 19mm, 길이 200mm, 두께 0.25 mm의 스테인레스 스틸을 사용하였고, 관내의 유동을 층류유동이 되도록 하기 위하여 상단부와 하단부에 황동 메쉬(#200)20장을 삽입하였다. 재생기는 내경 35mm, 길이 100mm, 두께 1mm인 스테인레스 스틸을 제작하였고 충전재는 #250의 원형으로 된 황동 메쉬 790장을 사용하였다. 맥동관과 재생기의 덮개부분은 황동을 사용하였고 누수를 막기 위해 경납땜(brazing) 하였다. hot end 부의 유량조절을 위한 니들 밸브는 최대 유량계수가 0.03인 것을 사용하였다. 각 구성품들간의 연결은 외경이 6mm인 동관을 사용하여 연결하였다. Fig. 4 는 제작된 냉동기의 본체 사진이다.

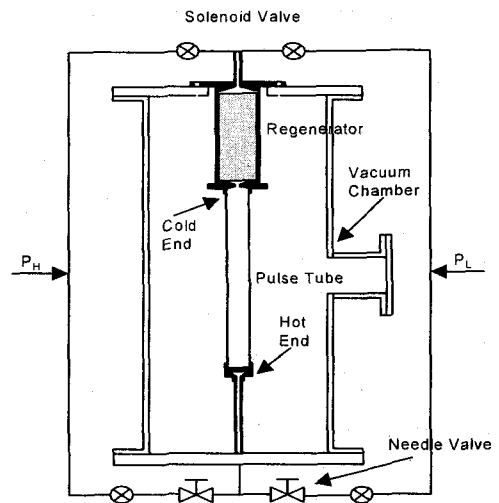


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus.

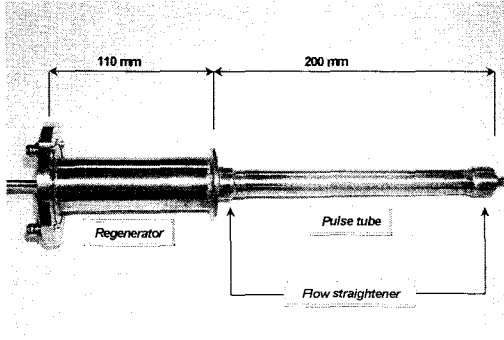


Fig. 4 Photograph of the main body of refrigerator

### 3.2 실험

Fig. 5는 전체 시스템의 사진이며, 작동유체는 헬륨압축기(CTI : 9200)를 사용하여 연속적으로 시스템에 공급되도록 하였으며 맥동관의 폐단부와 3번 밸브, 4번 밸브 사이에는 니들 밸브(Swagelok: SS-4MG-MH)를 설치하였다. 작동유체의 유출입의 조절은 솔레노이드 밸브(CKD: AB41-03-2)에 의하여 이루어지며, 솔레노이드 밸브의 구동을 위하여 Timer (Autonics : FS4E )를 사용하였고 온도는 압력을 측정하기 위하여 데이터로거 (Fluke: NetDAQ 2640A) 와 온도 컨트롤러 (Lakeshore : Temperature controller 330)을 사용하였다. 온도는 T-type 열전대와 실리콘 다이오드 센서 (Lakeshore : DT-420)를 사용하여 냉각부인 재생기와 맥동관 연결부, 맥동관 상단부, 그리고 재생기 하단부 표면에 설치하였다. 압력은 strain gauge type의 압력 변환기(Sensotec: P-100MV)를 사용하였다. 기본형 맥동관 냉동기의 실험은 앞에서 제작된 맥동관 냉동기의 3번, 4번 밸브는 항상 닫은 상태에서 실험했으며, 니들 밸브의 개도 조절은 외부에서 수동으로 조절하였다.

## 4. 실험 결과 및 검토

### 4.1 사이클 해석

최적의 사이클 시간을 탐색하기 위하여 각각의 작동주기에 대하여 각 과정들을 증가 및 감소시키는 방법으로 각 과정의 최적시간을 구하였다.

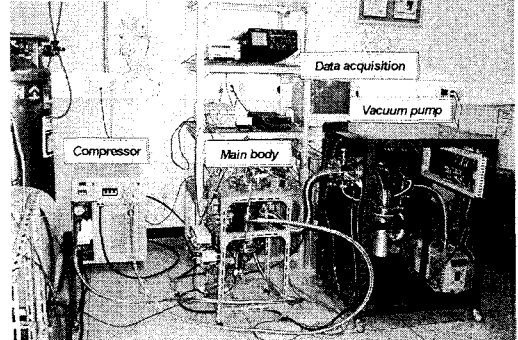


Fig. 5 Photograph of the refrigerator system

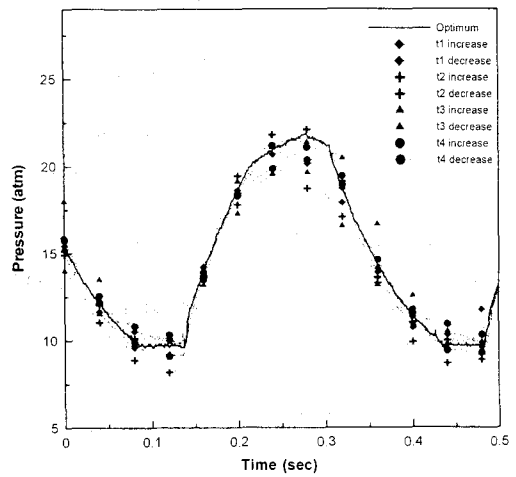


Fig. 6 The pressure history of the different time of each process (3Hz)

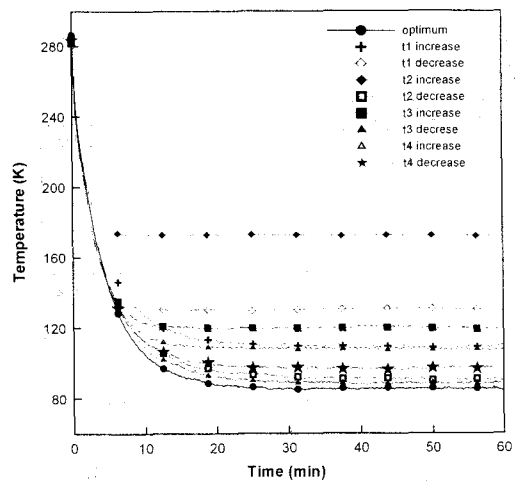


Fig. 7 The no-load temperature of the different time of each process (3Hz)

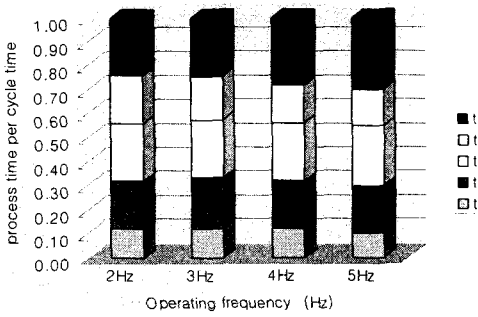


Fig. 8 The process time per cycle time at each operating frequency

Fig. 6은 각각의 과정을 Digital timer를 이용하여 솔레노이드 밸브의 최적 시간을 찾아가는 과정을 보여주고 있으며, 그때의 압력선도를 최적의 압력선도와 비교하여 나타낸 그림이다. 이때의 무부하 도달온도를 Fig.7에 나타 내었다. 이러한 과정을 2Hz~ 5Hz의 작동주기에 따라 수행한 결과가 Fig. 8에 나타 났으며, 작동주기가 변하더라도 1~5 과정의 각 과정시간 대 전체사이클 시간의 비가 거의 일정함을 알 수 있었다.

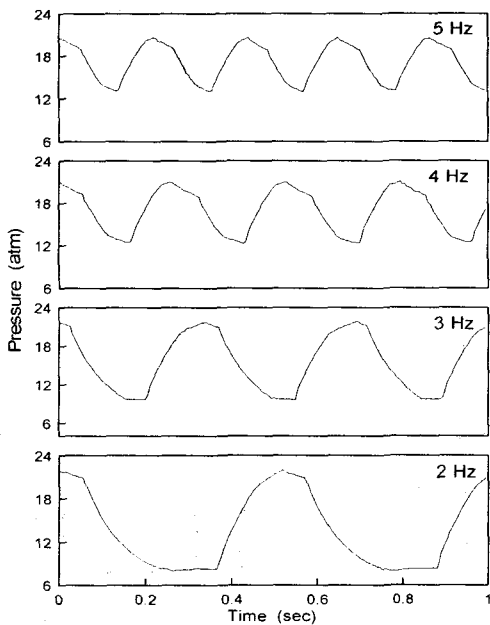


Fig. 9 Pressure waves at the inlet of the pulse tube refrigerator with each Hz

#### 4.2 성능 실험

Fig. 9에서는 각 주기에 대한 최적 조건일 때 4밸브형 맥동관 냉동기의 내부의 압력분포를 나타 낸 것이며, 주기에 상관없이 최저온도에서의 압력 분포는 유사함을 알 수 있다. Fig. 10~11에서는 최적 개도 조건에 대해 작동 주파수 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz, 5Hz에 대한 4밸브형 맥동관 냉동기의 최저도달 온도와 냉동능력을 나타내고 있다. 본 연구에서 제작된 4밸브형 맥동관 냉동기는 4Hz 1번 니들 밸브 개도를 39.1%, 2번 니들 밸브 개도를 32%에서 무부하 최저온도 85K를 얻었다.

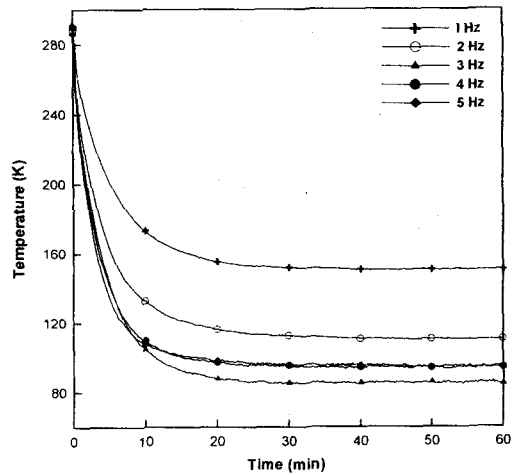


Fig. 10 The no-load temperature of 4 valve pulse tube refrigerator at each Hz

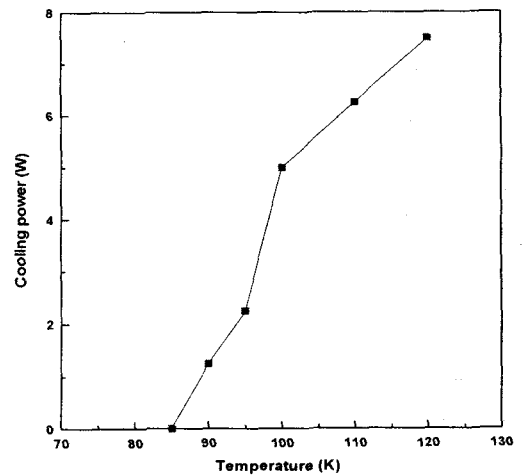


Fig. 11 The cooling power of refrigerator with optimal condition (3Hz)

## 5. 결 론

본 연구에서는 자체 제작된 4밸브 맥동관 냉동기의 작동압력에 대해 각각의 작동주기에 대한 구동 및 성능실험을 통하여 최적의 사이클 시간을 탐색 하였으며, 각 과정시간 대 사이클 시간의 비는 각각의 작동주기와 상관없이 대략 1과정 12%, 2과정 20%, 3과정 24%, 4과정 18%, 5과정 26%를 나타 내었다.

또한 성능실험 결과 작동 압력이 21기압에서 10기압일 때, 1번 니들 밸브 개도율이 39% 2번 니들밸브 개도율이 32 %, 작동주기는 3Hz에서 무부하 85K 온도를 얻었으며, 100K에서 약 5W의 냉동 능력을 얻었다.

## 참고문헌

1. Randall F. Barron, 1985, "Cryogenic Systems", 2nd ed., Oxford University Press.
2. G. Haselden, 1971, "Cryogenic Fundamentals, Part 1, Part 2", Academic Press, London and New York.
3. G. Walker, 1983, "cryocoolers, Part 1, Part 2", Plenum Press, New York.
4. G. Walker, E.R. Bingham, 1994, "Low - Capacity Cryogenic Refrigeration", Clarendon Press. Oxford.
5. Gifford, W. M. and Longworth, R. C., 1963, "Pulse tube refrigeration," ASME paper No.63-WA-290.
6. Milulin, E. I., Tarasov, A.A. and Shkrebbyonock, M. P., 1984, "Low temperature expansion pulse tube," *Advanced in Cryogenic Engineering*, Vol. 29, Plenum Press, New York, pp. 629-637.
7. Zhu, S., Wu, P. and Chen, Z., 1990, " Double inlet pulse tube refrigerator : An important improvement," *Cryogenics*, Vol.30, pp.513-520.
8. Matsubara, Y., and Miyak, A., 1988, " Alternative Methods of The Orifice Pulse Tube Refrigerator," *Proceedings of the 5th International Cryocooler Conference*, pp. 127~135.
9. Matsubara, Y., Kaneko, M., and Miyak, A., 1989, "Conceptual Design of Modified Pulse Tube Refrigerator," *Proceedings of the 5th International Cryocooler Conference*, pp. 22~26.
10. Kaiser, G., Brehm, M., and Seidel, P., 1996, "Thermodynamic analysis of an Ideal Four-Valve Pulse Tube Refrigerator," *Cryogenics*, Vol. 36, No. 7, pp. 527~533.
13. Kaiser, G., Brehm, H., Wagner, R., Gerster, J., Wunderlich, S., Thurk, M., and Seidel, P., 1997, "Advantages of a Four-Valve Pulse Tube Cryocooler for High-Tc Sensor Operation," *Cryogenics*, Vol. 37, No. 10, pp. 699~703.
14. 김대현, 조경철, 이상원, 정평석, 김수연, 2000, "4밸브형 맥동관 냉동기의 실험적 연구," *공기조화냉동공학회 동계학술대회 논문집*, pp 507~511