

## 스터링형 오리피스 맥동관 냉동기의 성능특성에 관한 연구

### Study of the performance characteristics of the Stirling type orifice pulse tube refrigerator

홍용주\*, 박성제\*, 김효봉\*, 김양훈\*\*, 최영돈\*\*\*

Y. J. Hong\*, S. J. Park\*, H. B. Kim\*, Y. H. Kim\*\*, Y. D. Choi\*\*\*

**Abstract** : In this study, the performance of the Stirling type orifice pulse tube refrigerator(OPTR) with a linear compressor was investigated by experiment. The dynamic pressures at three points and a temperature at the cold heat exchanger are measured to explore the dependency of the orifice on the performance of the OPTR.

The experimental results show that the opening of the orifice has significant effects on the no load temperature and cool down characteristics. The pressure amplitude in pulse tube decrease as the opening of the orifice increase, but the mass flow rate through the orifice and the electric input power to the compressor increase. The results show that the operating frequency and charging pressure does not affect on the no load temperature. The pressure amplitude in pulse tube decrease as the operating frequency increase or the charging pressure decreased.

**Key Words** : Pulse tube refrigerator, orifice, Stirling type, performance characteristics, no load temperature

## 1. 서 론

스터링 냉동기(Stirling refrigerator) 및 G-M 냉동기(Gifford McMahon refrigerator)에서 저온부의 진동, 수명, 신뢰성 문제 및 축방향 전도손실, shuttle 열손실 등을 유발하는 변위기(displacer)를 제거한 맥동관 냉동기(pulse tube refrigerator)는 광범위한 냉각조건에 대한 적용성 및 높은 신뢰성으로 인하여, 적외선센서 냉각, 고진공펌프 등 다양한 분야에서 그 활용도가 증대되고 있다.

오리피스 맥동관 냉동기는 1984년 Mikulin 등[1]에 의해 맥동관 내부에 오리피스가 설치된 형태로 제안되어 최저도달온도가 105K에 도달하였으며, 1985년 Radebaugh 등[2]에 의해 맥동관 외부에 오리피스가 설치된 형태로 개량되어 최저도달온도가 60K에 도달하였다.

1990년대에는 맥동관 냉동기의 최적화를 통해 40K에 도달하는 수준에 이르러, 스토링 냉동기의 성능에

필적하는 수준에 도달하였다. 오리피스 맥동관 냉동기는 오리피스에서의 에너지 소산으로 인해 성능계수(COP)가 스토링 및 G-M 냉동기에 비해 낮고, 맥동관과 저장소로 인해 재생기를 통과하는 질량유량이 상대적으로 증가하여, 점성손실이 크게 발생하며, 설치 방향의 제한이 있으나, 저온부에 변위기가 존재하지 않기 때문에, 진동이 작고, 제작이 용이하고, 높은 신뢰성을 보장할 수 있는 장점을 지니고 있다.

오리피스 맥동관 냉동기(orifice pulse tube refrigerator, 이하 OPTR)는 압력과 작동유체의 거동 및 위상을 제어하는 스토링 및 G-M 냉동기의 변위기를 대신하여 오리피스 및 저장소(reservoir or buffer volume)를 통해 적절한 위상을 생성하고, 맥동관내에서 반복적인 작동유체의 압축 및 팽창과정을 통해 냉각을 발생시키는 구조를 지니고 있다.

Storch 등[3]은 이론해석을 통해 오리피스 맥동관 냉동기에서 냉동능력은 압력진폭 및 재생기와 오리피스를 통과하는 질량유량의 비 즉 저온부에서의 압력과 질량유량의 위상차에 의해 결정됨을 제시한 바 있다. 또한 Huang 등[4]은 오리피스 맥동관 냉동기의 맥동관의 직경, 체적, 길이, 운전주파수 등 형상인자의 변화에 따른 최저도달온도, 성능계수의 변화를 실험적으로 고찰하여, 냉동능력 관계식을 제안한바 있다.

한편, De Boer[5]는 선형 1차원 모델을 이용한 해석을 통해, 오리피스 개도 및 운전주파수가 오리피스 맥동관 냉동기의 운전특성 및 최적운전조건에 미치는 영향에 대한 고찰을 수행한바 있다.

본 연구는 이와 같은 오리피스 맥동관 냉동기의 운전특성 인자 중 운전주파수 및 충전압력, 오리피스 벨브 개도의 변화에 따른 오리피스 맥동관의 성능 특성 변화를 파악하고자 한다. 이를 위해 맥동관 냉동기를 제작하여, 실험을 통해 최대 냉각성능을 발휘하는 오리피스의 개도를 도출하고, 운전주파수 및 충전압력, 오리피스 개도에 따른 맥동관 냉동기 내부의 압력, 질량유량의 위상각 변화를 실험적으로 고찰하였다.

## 2. 해 석

스터링형 오리피스 맥동관 냉동기는 선형압축기, 후부열교환기, 재생기, 저온 열교환기, 맥동관, 고온 열교환기, 오리피스, 저장소로 구성된 냉각부로 구성된다. 오리피스 맥동관 냉동기의 냉동을 발생시키는 과정은 압축기에 의해 압축된 고압의 헬륨가스가 맥동관으로 유입되고, 동시에 맥동관과 저장소의 압력차이로 인해 가스의 일부는 오리피스를 통과하여 저장소로 유입된다. 이때 고온 측 열교환기를 통해 외부로 열이 방출된다. 다음 과정으로써, 맥동관의 헬륨가스가 팽창하여, 재생기 측으로 유입되게 된다. 이때 팽창으로 인

\* 정 회 원 : 한국기계연구원 열유체공정기술연구부

\*\* 학생회원 : 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 비 회 원 : 고려대학교 기계공학과

원고접수 : 2002년 10월 04일

심사완료 : 2003년 01월 14일

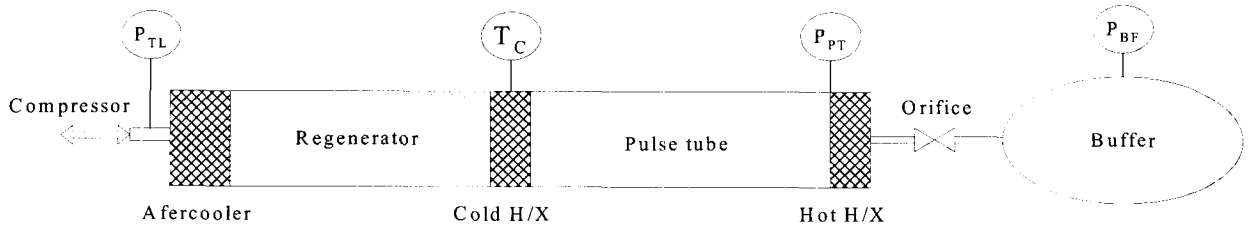


그림 1. 오리피스 맥동관 냉동기 개략도  
Fig. 1. The schematic diagram of OPTR

한 온도강하가 발생하여 냉동효과를 얻게 된다. 동시에 저온열교환기를 통해 주위로부터 열을 흡수하게 된다.

오리피스 맥동관 냉동기에서 발생하는 압력 및 헬륨가스의 질량유량을 1차 하모닉의 정현파로 가정하면, 맥동관에서 압력파형 ( $P_{PT}$ ), 저온부 질량유량 ( $\dot{m}_C$ ), 오리피스를 통과하는 질량유량 ( $\dot{m}_H$ ), 압력비 ( $\pi_{PT}, \pi_{BF}$ )는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.[5]

$$P_{PT} = P_{PT,0} \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\dot{m}_C = \rho_C C_C (P_{TL} - P_{PT}) = \dot{m}_{C,0} \sin(\omega t + \theta_C) \quad (2)$$

$$\dot{m}_H = \rho_H C_H (P_{PT} - P_{BF}) = \dot{m}_{H,0} \sin(\omega t + \theta_H) \quad (3)$$

$$\pi_{PT} = P_{TL,0} / P_{TL,0} \quad (4)$$

$$\pi_{BF} = P_{BF,0} / P_{TL,0} \quad (5)$$

여기서 P는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $\omega$ 는 각속도, t는 시간, C는 컨덕턴스,  $\theta$ 는 위상각을 의미하고, 하첨자 PT는 맥동관, TL은 압축기, BF는 저장소, C는 재생기 저온단, H는 오리피스, O는 진폭을 각각 나타낸다.

이러한 오리피스 맥동관 냉동기의 최대 냉동능력 ( $Q_{max}$ )은 이상적인 경우(등엔트로피 과정) 개방계에 대한 열역학 제1법칙과 제2법칙을 통해 다음과 같이 PV일로 나타낼 수 있다.[6]

$$Q_{max} = 1/2 P_{PT,0} (\dot{m}_{H,0} / \rho_H) \cos(\theta_H) = 1/2 P_{PT,0} (\dot{m}_{C,0} / \rho_C) \cos(\theta_C) \quad (6)$$

이때 오리피스를 통과하는 질량유량은 저장소내의 헬륨가스의 거동을 등온과정으로 가정할 때, 이상기체 법칙을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_{H,0} = \frac{V_{BF}}{RT_H} \omega P_{BF,0} \quad (7)$$

실제 맥동관 냉동기의 냉동능력은 식(6)으로 주어진 이상냉동능력에서 재생기 및 맥동관에서의 손실을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 최저도달온도, 압축기 출구, 맥동관 고온부, 저장소의 압력을 측정하였으며, 식(1)-(7)로부터 각각의 위상각 및 질량유량을 산출하였다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 선형압축기로 구동되는 오리피스 맥동관 냉동기의 개략도이다. 실험에 사용된 선형압축기는 독

표 1. 오리피스 맥동관 냉동기 주요사항  
Table 1. Specification of the OPTR

| Item        | Spec.                                       |         |
|-------------|---|---------|
| PTR type    | in-line                                     |         |
| compressor  | Leybold Polar SC-7<br>( $W_{in,0} = 250W$ ) |         |
| aftercooler | Water cooling                               |         |
| regenerator | mesh  | #400    |
|             | diameter                                    | 2.54 cm |
|             | volume                                      | 38 cc   |
| pulse tube  | diameter                                    | 1.27 cm |
|             | volume                                      | 8.87 cc |
| orifice     | SS-4L $C_{v,max} = 0.15$                    |         |
|             | SS-4MG $C_{v,max} = 0.03$                   |         |
| buffer      | 300 cc                                      |         |

일 Leybold사의 dual acting, 코일구동형인 Polar SC-7 COM 모델로서 상용 전력은 250 W이며, 냉동능력 5W급 스티어링 냉동기의 압력 발생 장치로 설계, 제작된 선형압축기이다.

오리피스는 유량계수( $C_v$ )를 조절하기 위해 최대 유량계수가 0.03(오리피스 직경 1.42 mm) 및 0.15(오리피스 직경 3.25 mm)인 metering 밸브를 사용하였으며,  $C_v$ 의 변화는 밸브 개도 조절을 통해 구현하였다. 상세한 오리피스 맥동관 냉동기의 사양은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

실험은 주위로부터의 대류 열손실 및 전도 열손실을 방지하기 위하여 맥동관 냉동기의 팽창부를 진공용기(dewar) 내에 설치한 후, 진공용기 내의 진공도를 확산 진공펌프를 사용하여  $10^{-5}$  torr로 유지하면서 수행하였다. 저온부의 온도측정을 위해서는 Lakeshore사의 silicon - diode 온도센서를 저온 열교환기 외부에 설치하였다. 한편 선형압축기의 구동은 Fujitsu사의 교류전원기(모델 : M2PS1000)를 사용하였으며, 냉동기의 초기 충전압력 및 작동압력을 측정하기 위하여 맥동관의 고온부에 Kyowa사의 압력센서(모델 : PVL-50)를 설치하였고, 압축기 출구, 맥동관 고온부, 저장소에 각각 PCB사의 압전형 압력센서(모델 : 112A04)를 설치하였다. 이와 같이 맥동관 냉동기 및 선형압축기에 설치된 전력, 압력, 온도 등 각종 센서들로부터의 출력신호들은 Labview를 통해 수집, 처리하였다.

실험은 선형압축기의 운전 특성을 고려하여, 30 Hz 부근의 운전주파수, 충전압력 20 ~ 30  $kgf/cm^2G$ 의 범위에 대해 수행하였으며, 실험 중 선형압축기로 인가되는 교류전압은 35  $V_{RMS}$ 를 유지하였다. 또한 불순물의 유입으로 인한 냉동기의 성능저하를 방지하기 위해 충전전 진공배기를 실시한 후 고순도 헬륨(순도 99.999% 이상)을 작동유체로 충전, 사용하였다.

Fig. 2는 운전주파수 30Hz, 충전압력 25  $kgf/cm^2G$ , 저온부온도 200K일 때 측정된, 오리피스 맥동관 냉

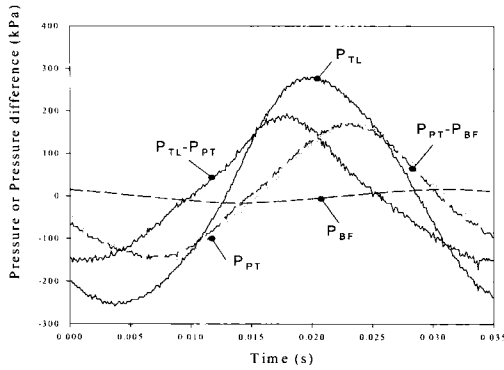


그림 2. 오리피스 맥동관 냉동기의 압력 및 압력차  
Fig. 2. Pressure and pressure difference of the OPTR

동기의 압력 및 압력차를 나타낸 그림으로, 맥동관 고온부의 압력은 재생기의 압력강하로 인해 압축기 출구 압력보다 진폭이 작고, 시간지연, 즉 위상차가 발생하며, 저장소의 압력진폭은 매우 작게 발생하여, 오리피스 양단의 압력차는 맥동관 고온부의 압력과 거의 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결과 및 검토

##### 4.1 강온 및 최저도달온도 특성

맥동관 냉동기의 강온 및 최저도달온도, 입력전력은 맥동관 냉동기의 성능을 판정하는 주요한 요소이다. 본 연구에서는 오리피스 밸브 개도 변화 즉  $C_v$ 의 변화에 따른 맥동관 냉동기의 성능을 고찰하기 위해, 운전주파수 30Hz, 충전압력 25 kgf/cm<sup>2</sup>G, 입력전압 35V의 동일한 조건에서 강온실험을 수행하여, 그 성능을 비교하였다.

Fig. 3은 오리피스 밸브의  $C_v$ 의 변화에 따른 강온 특성을 나타낸 그림으로  $C_v$ 가 0.0560에서 0.0308로 감소하면서, 250K에 도달할 때까지는 거의 유사한 강온 특성을 나타내나, 저온부의 온도가 더 낮아지면 강온 특성의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는  $C_v$  변화에 따른 무부하 최저도달온도를 나타낸 그림으로,  $C_v$ 가 감소하면서 최저도달온도가 감소하나,  $C_v=0.023$  보다 작은  $C_v$  영역에서는 오히려 최저도달온도가 상승함을 알 수 있다. 이는  $C_v$ 가 감소하면서 오리피스를 통과하는 유동의 유동저항이 급격

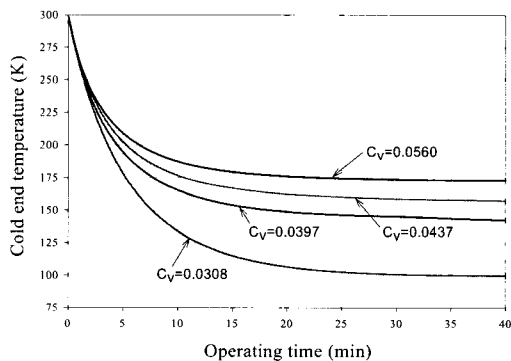


그림 3. 밸브개도에 따른 강온특성  
Fig. 3. The cool down characteristics of OPTR

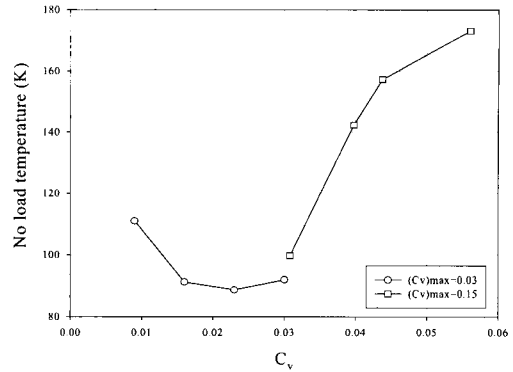


그림 4.  $C_v$ 에 따른 최저도달온도  
Fig. 4. No load temperature as function of  $C_v$

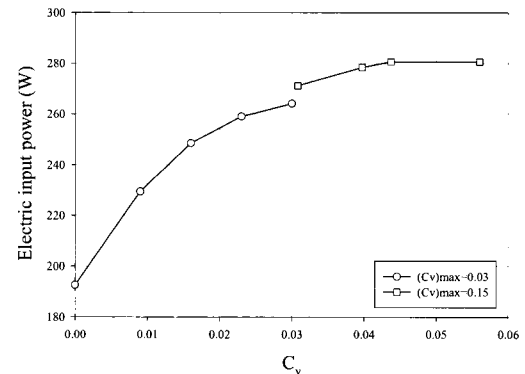


그림 5.  $C_v$ 에 따른 입력전력  
Fig. 5. Input power as function of  $C_v$

히 증가하여, 맥동관 내에서 발생하는 파형특성이 진행파(Progressive wave, 압력과 질량유량의 위상차가 90도)에서 정재파(Standing wave, 압력과 질량유량의 위상차가 0도)의 특성으로 즉 기본형 맥동관 냉동기로 변화하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5는 저온부의 온도가 정상상태로 유지될 때 선형압축기로 공급되는 입력전력을 나타낸 그림으로,  $C_v$ 가 증가하면 입력전력이 증가됨을 알 수 있다. 이는  $C_v$ 가 커질수록, 저장소로 유·출입되는 질량유량이 증가하면서 선형압축기의 운전특성에 영향을 미치는 부가 체적이 커짐으로 인해 입력전력이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은  $C_v=0.023$ 일 때, 강온 중 맥동관 및 저장소의 압력진폭을 나타낸 그림이다.

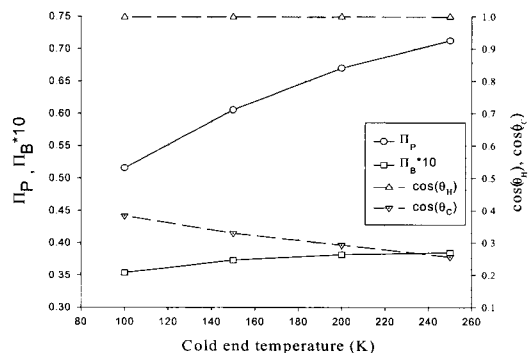


그림 6. 저온부 온도에 따른 맥동관과 저장소의 압력진폭 및 위상각  
Fig. 6. The pressure amplitude as function of cold end temperature

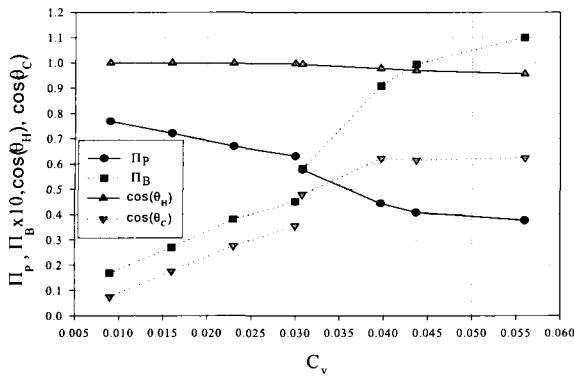


그림 7. 밸브 개도에 따른 압력진폭 및 위상  
Fig. 7. The pressure amplitude and cosine of phase angle at the pulse tube and buffer as function of  $C_v$

맥동관 및 저장소의 압력진폭은 냉동기의 저온부의 온도가 감소되면서, 그 진폭이 감소하고, 특히 맥동관의 압력진폭은 큰 감소를 나타냄을 알 수 있다. 한편 식(3)에서 정의된 위상각은 매우 작아, 오리피스를 통과하는 질량유량이 맥동관 압력과 거의 동일위상을 나타내고, 저온부 온도에 따른 변화가 거의 발생하지 않았다. 또한 오리피스를 통과하는 질량유량은 식(7)에서 알 수 있는 바와 같이 압력진폭만의 함수이므로, 저온부의 온도가 감소되면서 맥동관의 PV일 즉 최대 이론냉동능력은 감소됨을 알 수 있다. 그러나 저온부에서는 온도가 감소하면서 위상각이 감소하고, 식(6)에서 정의된 PV일에 기여하는 역할은 증대됨을 알 수 있다.

4.2 압력 및 위상 특성

Fig. 7은 저온부의 온도가 200 K로 동일할 때,  $C_v$ 에 따른 압력진폭 및 위상각 특성을 나타낸 그림이다. 이 경우 운전조건은 운전주파수는 30 Hz, 충전압력 25 kgf/cm<sup>2</sup>G, 입력전압 35V이다.  $C_v$ 가 커질수록 즉, 오리피스로 인한 유동저항이 감소할수록, 맥동관으로부터 저장소로 유출입하는 헬륨가스의 질량유량의 증가로 인해 맥동관의 압력진폭은 감소된다. 그리고 저장소에서의 압력진폭은 증가하고, 맥동관 저온부에서 질량유량의 위상각 역시 증가하고 있다.

4.3 충전압력 및 운전주파수

Fig. 8 및 9는  $C_v=0.023$ 인 경우, 운전주파수의 변화(충전압력 25 kgf/cm<sup>2</sup>G)와 충전압력변화(운전주파수 30 Hz)에 대한 무부하 최저도달온도를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 선형압축기의 운전특성을 고려하여 충전압력 및 운전주파수의 변화 범위를 설정하였기 때문에, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최저도달온도는 운전조건 변화에 대해 약 3K 내의 차이만 발생하였다. 그러나 저온부의 온도가 정상상태를 유지할 때 입력전력(인가전압 35V)은 충전압력에 대해서는 큰 차이가 발생하지 않았으나, 운전주파수가 30Hz 보다 큰 경우에는 입력전력의 급격한 증가가 발생하였다. 따라서 Hong 등(7)의 결과와 같이 고려해 볼 때 선형압축기의 공진주파수는 30 Hz보다 낮은 주파수 영역에서 형성되며, 충전압력의 변화는 공진주파수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 10 및 11은 저온부의 온도가 200K일 때, 맥

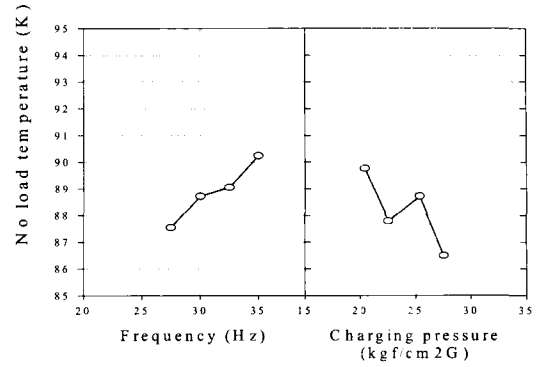


그림 8. 운전주파수 및 충전압력에 따른 무부하온도  
Fig. 8. No load temperature as function of frequency and charging pressure

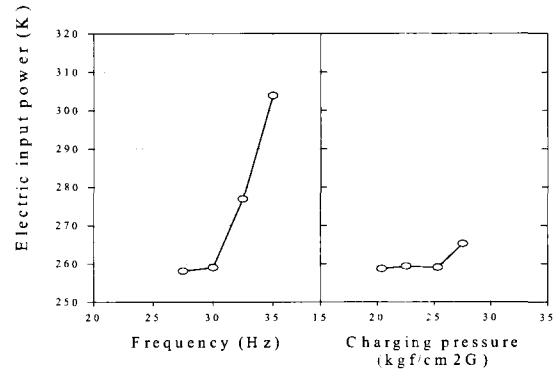


그림 9. 운전주파수 및 충전압력에 따른 입력전력  
Fig. 9. Input power as function of frequency and charging pressure

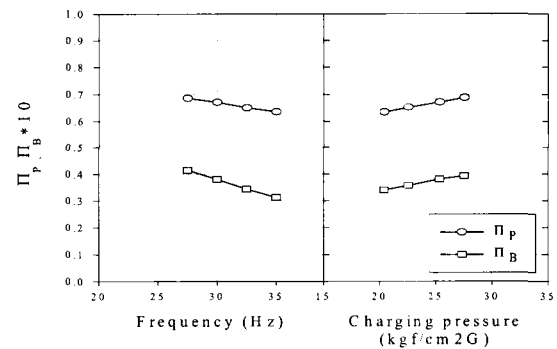


그림 10. 운전주파수 및 충전압력에 따른 압력진폭  
Fig. 10. The pressure amplitude as function of frequency and charging pressure

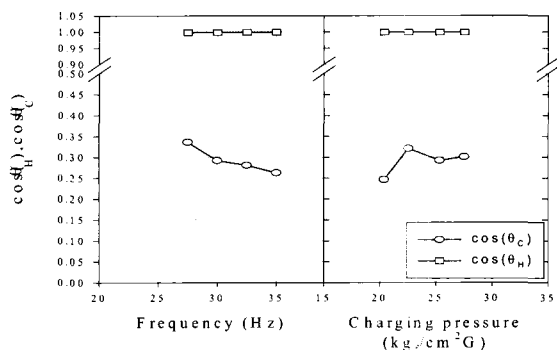


그림 11. 운전주파수 및 충전압력에 따른 위상각  
Fig. 11. The cosine of phase angle as function of frequency and charging pressure

동관 및 저장소의 압력진폭과 위상각을 나타낸 그림으로, 운전주파수가 증가할 때 및 충전압력이 작을 때 더 낮은 압력진폭을 나타낼 수 있다. 한편 오리피스에서의 질량유량은 충전압력 및 운전주파수와 관계없이 맥동관의 압력과 거의 동일위상을 나타내었으며, 맥동관 저온부 질량유량의 위상각은 운전주파수 및 충전압력의 영향으로 인해 그 특성이 변화하는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

오리피스 맥동관 냉동기의 오리피스밸브 개도, 충전압력, 운전주파수 등에 의한 성능특성 변화를 고찰하기 위해, 실험을 수행한 결과 맥동관의 압력 진폭 및 저온부 질량유량, 오리피스를 통과하는 질량유량의 위상각 변화를 고찰하였고, 다음과 같은 맥동관 냉동기의 성능 특성에 관한 결론을 도출하였다.

(1) 오리피스 밸브의 개도는 오리피스 맥동관 냉동기의 성능에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서의 맥동관 냉동기의 경우  $C_v=0.023$  부근에서 최적의 성능을 나타낸다.

(2) 오리피스 밸브의 개도가 일정할 때 저온부의 온도가 감소하면, 맥동관의 압력진폭과 오리피스를 통과하는 질량유량은 감소하나, 질량유량의 위상각은 일정하다.

(3) 오리피스 밸브의 개도가 증가하면, 맥동관의 압력진폭은 감소하고, 오리피스를 통과하는 질량유량과 선형압축기 입력전력이 크게 증가한다.

(4) 운전주파수 및 충전압력의 변화는 무부하시 최저도달온도에 큰 영향을 미치지 않으나, 공진주파수를 벗어나는 운전주파수의 증가는 입력전력의 큰 증가를 유발한다.

### 감사의 글

본 연구는 1999년도 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] 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

[2] 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. 779-789, 1985

[3] Storch, P. J. and Radebaugh, R., Development and experimental test of an analytical model of orifice pulse tube refrigerator, Adv. in Cryogenic

Engineering, Vol. 33, pp. 851-859, 1988

[4] B. J. Huang, G. J. Yu, Experimental study on the design of orifice pulse tube refrigerator, Int. J. of Refrigeration, Vol. 24, pp. 400-408, 2001

[5] P. C. T. de Boer, Optimization of the orifice pulse tube, Cryogenics, Vol 40., pp. 701-711, 2000

[6] Radebaugh, R., Development of pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler, Proc. Institute of Refrigeration (London) 1999-2000

[7] 홍용주, 박성제, 김효봉, 고득용, 김종학, 유병건, "스테어링냉동기의 선형압축기 운전특성에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp. 49-54, 2001

### 저 자 소 개



**홍용주(洪溶柱)**  
1968년 03월 19일생, 1990년 고려대 공대 기계공학과 졸업, 1992년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원



**박성제(朴聖濟)**  
1962년 12월 13일생, 1985년 부산대 공대 기계공학과 졸업, 1988년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 기계공학과 박사과정, 현재 한국기계연구원 선임연구원



**김효봉(金孝烽)**  
1960년 04월 10일생, 2000년 대전산업대 공대 기계공학과 졸업, 현재 충남대 공대 기계공학과 석사과정, 현재 한국기계연구원 주임기술원



**김양훈(金良勳)**  
1972년 04월 27일생, 1998년 제주대 공대 기계공학과 졸업, 2001년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 부산대 공대 기계공학과(박사과정)



**최영돈(崔英敦)**  
1950년 05월 30일생, 1973년 서울대 공대 기계공학과 졸업, 1975년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사), 1979년 KAIST 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 기계공학과 교수