

# 소형 압축기를 이용한 관성관형 맥동관 냉동기의 성능 특성에 대한 실험적 연구

김 홍 성, 정 상 권\*

한국과학기술원 기계공학과 대학원, \*한국과학기술원 기계공학과

## An Experimental Study on Performance of the Inertance Pulse Tube Refrigerator using a Small Compressor

Hongseong Kim, Sangkwon Jeong\*

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology  
Daejeon 305-701, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Daejeon 305-701, Korea

(Received September 16, 2004; revision received April 4, 2005)

**ABSTRACT:** This paper describes an experimental study on the inertance pulse tube refrigerator using a small compressor. The purpose of this experimental study is to identify the performance of the inertance pulse tube refrigerator for various operating conditions and to obtain the optimum configuration. The dead volume effect is verified by two experimental apparatuses with different dead volumes between the compressor and the aftercooler. The refrigerator of the smaller dead volume shows better performance. The influence of operating frequency and charging pressure on the performance of the refrigerator is experimentally investigated. Reducing the regenerator mesh size improves the performance of the refrigerator. Finally, the inertance pulse tube refrigerator has maximum cooling capacity at the specific combination of the pulse tube length and the inertance tube length. The loss analysis is used to analyze and predict the optimum condition of the pulse tube refrigerator.

**Key words:** Pulse tube(맥동관), Inertance tube(관성관), Dead volume(불용체적), Operating frequency(운전 주파수), Charging pressure(충전압력), Regenerator mesh(재생기 망)

### 기 호 설 명

$C_{ff}$  : 열전도도 감소지수

$e_v$  : 공극률

$g$  : 단위면적당 작동가스유량 [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$I_e$  : 재생기의 비유용도

$K_{ss}$  : 재생물질의 열전도율 [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]

$K_t$  : 재생기 관의 열전도율 [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]

$L$  : 길이 [m]

$l$  : 길이 [m]

$P$  : 압력 [atm]

$\dot{Q}$  : 열량 [W]

$R_{pr}$  : 압력비 ( $= P/P_m$ )

† Corresponding author

Tel.: +82-42-869-3039; fax: +82-42-869-8207

E-mail address: skjeong@kaist.ac.kr

- $r_p$  : 맥동관의 반경 [m]
- $T$  : 온도 [K]
- $u_A$  : 기체의 고온부 통과속도 [m/s]
- $V$  : 체적 [m<sup>3</sup>]

**그리스 문자**

- $\gamma$  : 비열비
- $\mu$  : 점성계수 [Pa·s]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\omega$  : 왕복유동의 각속도

**하첨자**

- $d$  : 불용 체적
- $i$  : 입구
- $o$  : 출구
- $p$  : 맥동관
- $r$  : 재생기
- $res$  : 저장소

**1. 서 론**

맥동관 냉동기는 1963년 Gifford and Longsworth<sup>(1)</sup>에 의해 기본형(basic pulse tube refrigerator)이 처음으로 개발되었으며, 1984년 Mikulin<sup>(2)</sup>에 의해 오리피스가 맥동관 끝에 연결된 오리피스형 맥동관 냉동기(Orifice type pulse tube refrigerator)가 개발되었다. 그 후 1994년 Kanao et al.<sup>(3)</sup>에 의해 오리피스 맥동관 냉동기의 오리피스를 관성관으로 대체한 방식의 관성관형 맥동관 냉동기(inertance pulse tube refrigerator)가 고안되었다.

기본적으로 맥동관 냉동기는 저온부 내부에 기계적인 구동부(변위기 또는 팽창 피스톤) 대신 기체 변위기만 존재하므로 마모의 문제가 없으며, 열발생 및 소음, 진동의 문제도 적다는 장점을 가지고 있다. 또한 맥동관 냉동기는 구성요소 및 운전조건에 따라 광범위한 냉각 온도범위에 적용할 수 있어, 기존 G-M 냉동기 및 스틸링 냉동기의 적용영역에서 이들을 대체할 수 있는 유력한 대안으로 부각되고 있다. 특히 관성관형 맥

동관 냉동기는 스틸링형 맥동관 냉동기에서 중요한 맥동관에서의 압력과 질량유량의 관계를 관성관을 이용하여 최적화시켜 원하는 성능을 구현할 수 있다. 이와 관련하여 Zhu et al.<sup>(4)</sup>은 맥동관 냉동기에서 관성관의 길이 및 직경의 변화가 맥동관 내의 질량유량과 압력파형에 미치는 영향에 대해 해석을 수행하여, 관성관이 오리피스에 비해 더 큰 위상 조절효과가 있음을 제시하였다. Roach et al.<sup>(5)</sup>은 전기회로 상사 해석을 통해 관성관과 맥동관 냉동기 체적과의 상관성을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 최대 소비전력이 40W인 소형 선형 압축기를 사용하여 작동하는 관성관형 맥동관 냉동기를 구현하여 실험을 수행하였다. 이러한 소형 맥동관 냉동기는 소형 적외선 센서의 안정적인 냉각에 효과적이며, 특히 인공위성에서 소비전력의 제한이 있을 때 적외선 센서나 통신 시스템의 냉각에 응용이 가능하다.<sup>(6)</sup> 이러한 작은 용량의 압축기에 대응하는 소형 관성관형 맥동관 냉동기는 비평형 상태의 운전조건을 가지므로, 그 성능은 여러 가지 인자에 매우 민감하게 반응하므로, 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 불용 체적의 변화, 운전 주파수, 충전 압력, 관성관 및 맥동관의 형상, 재생기 망치수번호(mesh number)의 변화 등의 인자가 관성관형 맥동관 냉동기의 최저 도달온도에 미치는 영향을 실험적으로 고찰한다. 즉, 소형 맥동관 냉동기를 설계하고 이를 제작, 실험하였을 때 발생하는 손실을 해석하며, 최적의 운전조건을 찾아 보고, 냉동기의 성능으로 판단되는 저온부의 온도를 예측한 해석과 비교해 보고자 한다.

**2. 실험장치 및 실험조건**

**2.1 실험장치의 구성**

Fig. 1은 소형 관성관형 맥동관 냉동기의 실험 장치를 개략적으로 보여주는 그림이다. 불용 체적을 줄이기 위하여 본 논문에서는 세 가지 방법을 적용하였다. 첫째, 압축기와 재생기 사이의 간격을 최소화하도록 연결관(split tube)을 설계하였다. 둘째, 재생기 입구의 맥동 압력을 측정하기 위해 필요한 압력 센서는 후 냉각기(aftercooler)에 직접 흡을 내어서 일체형으로 부착하였다. 셋

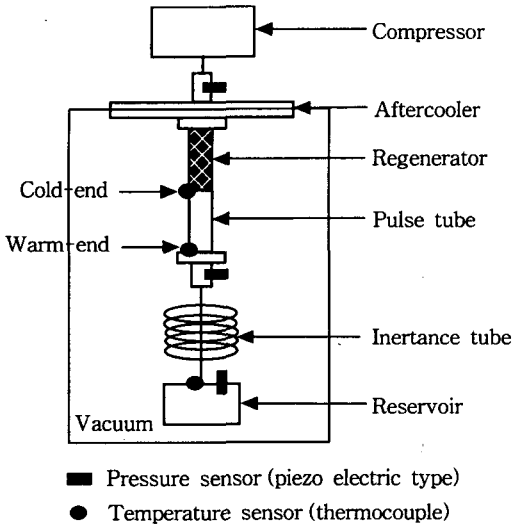


Fig. 1 Schematic diagram of inertance pulse tube refrigerator.

재, 냉동기 내부를 진공으로 유지하고, 작동유체인 헬륨을 충전하기 위한 밸브는 저장소(reservoir)에 설치하였다. 또한 재생기와 맥동관도 스테인리스 스틸관을 일체형으로 제작하여 이루어졌다. 재생기 내부에는 스테인리스 스틸망(stainless steel mesh #200, #400)이 적층되어 있으며, 재생물질이 아래로 이탈하지 않도록 재생기와 맥동관 사이에 턱을 내었다. 이것은 소형 맥동관 냉동기에서 불용 체적을 최소화하는 유용한 방법이다.<sup>(7)</sup> 재생기의 길이는 40 mm, 지름은 6.35 mm으로 고정하였고, 맥동관의 길이를 바꾸어 주기 위해 재생기와 맥동관이 일체형인 모델을 각각 3가지를 제작하였다. 각각에 해당하는 맥동관 길이는 40 mm, 50 mm, 60 mm의 3가지이며, 교환의 용이성을 위해 일체형으로 제작된 재생기와 맥동관은 플랜지 형식으로 고정하였다. 또한 관성관의 외경 2 mm, 내경 0.9 mm인 튜브를 각각 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm 길이로 절단하여 사용하였고, 저장소의 체적은 Roach et al.<sup>(5)</sup>이 제안한 전기적 상사를 이용하여 150 cc로 결정하였다.<sup>(8)</sup> 재생기 입구와 맥동관 출구, 저장소의 압력은 각각의 위치에 따로 설치된 압전 압력 센서(PCB 111A26)를 이용하여 측정되었다. 온도측정을 위하여 저온부와 고온부 열교환기, 그리고 저장소에 각각 E-type 열전대를 부착하였다. 또한 단열조건에서의 냉동기 특성을 파악하기 위해 진

Table 1 Operating conditions and pulse tube geometries

Item	Value	
Mean pressure	15, 17.5, 20 atm	
Operating frequency	40, 45, 50, 55 Hz	
Regenerator size	$\phi 6.35 \times 40$ mm	
Regenerator mesh	#200	#400
Porosity ( $e_v$ )	0.694	0.683
Compressor input	35 W	25 W
Reservoir volume	150 cc	
Warm-end temperature	300 K	
Operating gas	Helium	
Pulse tube size	$\phi 6.35 \times 40, 50, 60$ mm	
Inertance tube size	$\phi 2 \times 60, 80, 100, 120$ cm	

공실험을 수행하였고, 진공은  $10^{-3}$  torr 이하를 유지하였다. 자세한 실험조건과 형상은 Table 1에 나타내었다.

## 2.2 실험조건 및 과정

본 연구에서 수행한 실험은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 불용 체적의 효과를 고찰한 실험에서는 충전 압력 17.5 atm, 운전 주파수 50 Hz, 재생기 200메쉬 등의 조건을 고정하고, 불용 체적이 각각 1.6 cc, 0.2 cc인 경우에 대해서 관성관 길이의 변화에 따른 냉동기의 성능변화를 측정하였다. 둘째, 운전 주파수 및 충전 압력의 변화가 냉동기의 최저 도달온도에 미치는 영향을 분석한 실험에서는 재생기 200메쉬, 맥동관 길이 50 mm로 고정하고, 운전 주파수를 40, 45, 50, 55 Hz로 충전 압력을 15, 17.5, 20 atm으로 변화시키면서 냉동기의 성능변화를 확인하였다. 셋째, 재생기의 망 수(mesh number)의 변화가 냉동기의 성능에 미치는 영향을 측정할 실험에서는, 운전 주파수 45 Hz와 충전 압력 20 atm 등의 조건을 고정하고, #200메쉬 망과 #400메쉬 망에 대해 맥동관과 관성관의 길이변화 영향을 고찰하였다. 이 실험에서는 망 치수 번호의 변화에 따른 냉동기의 최저 도달온도 변화뿐만 아니라 최대의 성능을 보이는 맥동관과 관성관의 길이, 즉 최적조건을 제시하였으며 손실해석을 통해 이를 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 불용 체적의 효과

압축기와 고온부 열교환기 사이에 존재하는 불용 체적의 효과를 파악하기 위하여, 압축기와 후냉각기 사이의 불용 체적이 1.6cc인 기존의 실험장치<sup>(7)</sup>와 2.1절에서 설명한 여러 가지 방법으로 불용 체적을 0.2cc로 감소시킨 실험장치를 통하여 얻어진 실험결과를 비교하였다. 재생기 길이와 맥동관 길이가 각각 40 mm인 경우에 대해서 관성관의 길이가 40 cm에서 120 cm까지 20 cm 간격으로 증가할 때 저온부의 온도를 Fig. 2에 비교하였다. 기존의 실험장치에서는 전체 부피(압축기, 관성관, 저장소의 부피 제외)의 36.4%를 불용 체적이 차지하고 있으며, 본 실험장치에서는 전체 부피의 8.7%만을 불용 체적이 차지한다. 즉, 본 실험장치는 기존의 장치에 비하여 30% 더 적은 부피를 가진다. 따라서 동일한 압축기에 대하여 불용 체적의 감소로 인하여 냉동기의 성능은 크게 향상되었다. 이러한 직접적인 원인은 압력 진폭이 기존 장치에서의 압력 진폭보다 대략 20% 정도 향상되었기 때문인데, 불용 체적의 감소 영향이 단순히 냉동기의 냉각능력 향상에만 국한된 것은 아니다. 냉동기의 최저 도달온도가 더 낮아졌을 뿐만 아니라, 그러한 성능을 보이는 최적의 맥동관 길이와 관성관 길이도 변했음을 실험을 통해 알 수 있었다. 즉, 불용 체적이 1.6 cc인 장치에서는 맥동관의 길이 40 mm, 관성관의 길이

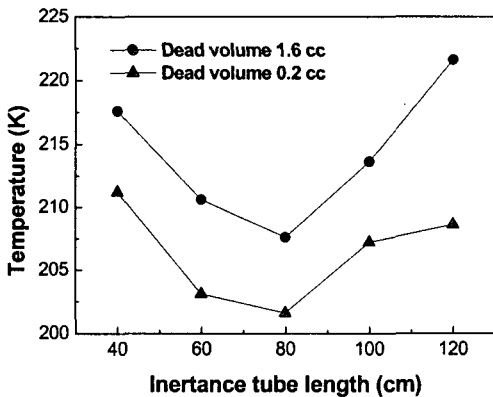


Fig. 2 Comparison of cold-end temperatures for different dead volumes (50 Hz).

80 cm에서 최대 성능을 보이지만, 불용 체적이 0.2 cc인 실험장치에서는 맥동관의 길이 50 mm, 관성관의 길이 80 cm에서 가장 낮은 최저 도달온도를 보였다. 따라서 다음 절에서는 모두 맥동관의 길이를 50 mm로 하여 실험을 수행하였다.

#### 3.2 운전 주파수 및 충전압력의 영향

운전 주파수 및 충전압력의 변화가 맥동관 냉동기의 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 가장 최적의 성능을 보였던 조건, 즉 불용 체적이 0.2 cc, 맥동관 길이 50 mm, 관성관 길이 80 cm인 조건에 대해서 운전 주파수와 충전압력을 변화시키면서 냉동기의 최저 도달온도를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 3으로서 먼저 충전압력이 증가함에 따라서 45 Hz 주위에서 최저 도달온도가 가장 낮게 되는 경향이 뚜렷해진다. 물론 20 atm 이상으로 충전하여 실험을 수행하지는 않았으나 (압축기의 최고 압력 제한 때문에), 고압에서 선형 압축기의 가스 스프링 강성계수(stiffness)가 증가하고, 20 atm에서는 45 Hz 주위에서 압축기 피스톤의 공진 주파수가 형성되어 압축기의 효율이 높고, 최적의 운전조건이 됨을 알 수 있다. 15 atm의 경우에는, 실험 주파수 범위 내에서 최적점이 관찰되지 않았는데, 이는 공진 주파수가 너무 낮기 때문으로 사료된다. 압축기 공진 주파수의 냉동기 성능에 대한 영향은 Fig. 4에서도 볼 수 있는데, 운전 주파수가 45 Hz일 때 맥동 압력 진폭의 크기가 2.99 atm로 가장 큰 값을 나타내

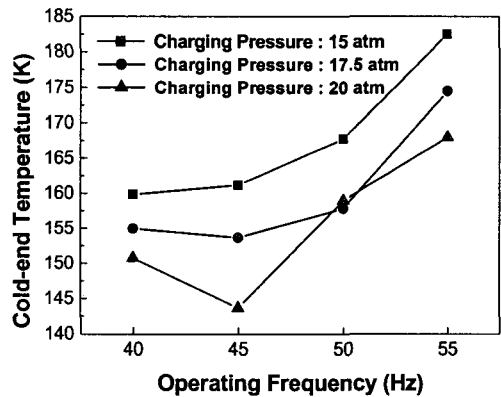


Fig. 3 Cold-end temperature with respect to operating frequency and charging pressure.

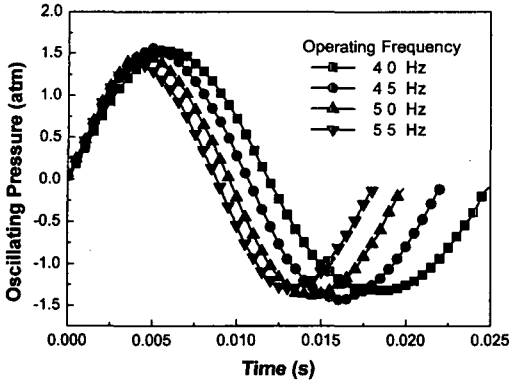


Fig. 4 Pressure amplitude with respect to operating frequency (charging pressure: 20 atm).

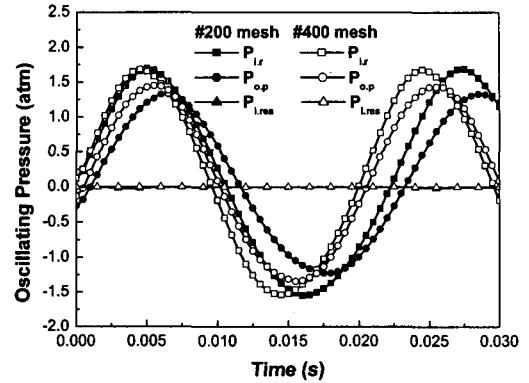


Fig. 6 Pressure distributions for different re-generator mesh numbers 12.

었다. 또한 Fig. 3에서 보면, 충전압력이 증가할수록 저온부 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

### 3.3 재생기 망 치수번호의 변화에 따른 영향

재생기 망 치수번호의 변화가 냉동기의 성능변화에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 망 치수번호가 200과 400인 재생기에 대해서, 재생기와 맥동관이 일체형인 모델 각각 3가지를 부가적으로 제작하였다. Fig. 5는 각각의 재생기 모델에서 맥동관 길이와 관성관 길이에 따른 냉동기 저온부의 온도변화를 나타낸다. 실험결과를 통해 재생기 망 치수번호가 증가하면 전체적인 냉동기 성능이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 재생기 망 치수번호가 증가하면 재생기의 전열면적이 증가하여 비유용도 손실이 감소하기 때문이다. 물

론 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 압력강하의 크기는 재생기 망 치수번호가 200인 경우에는 0.27 atm 이고, 망 치수번호가 400인 경우에는 0.34 atm으로 압력강하가 증가한다. 즉, 재생기 망 치수번호가 증가하면 압력강하의 증가로 질량유량이 감소하여, 맥동관에서 팽창일(PdV work)이 저하되는 효과도 발생한다. 하지만 Fig. 5의 결과에서 냉동기의 최저 도달온도가 더 낮은 것으로 보아 그 효과가 지배적이지 않다고 판단된다.

### 3.4 최적조건

앞 절의 Fig. 5 결과를 보면 동일한 맥동관 길이에 대해 최저 도달온도를 만들 수 있는 관성관 길이가, 망 치수번호 400인 경우에는 100 cm 주위, 망 치수번호 200인 경우에는 60~80 cm 주위인 것을 알 수 있다. 즉, 관성관 길이에 따라 최저 도달온도는 최적점을 기준으로 2차 곡선 형태를 보인다. 또한 동일한 관성관 길이에 대해서도 최저 도달온도를 만드는 맥동관 길이가 존재함을 알 수 있다. 이러한 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 본 논문에서는 손실해석<sup>(7)</sup>을 수행하였고, 그 결과는 다음 절에서 논의하겠다.

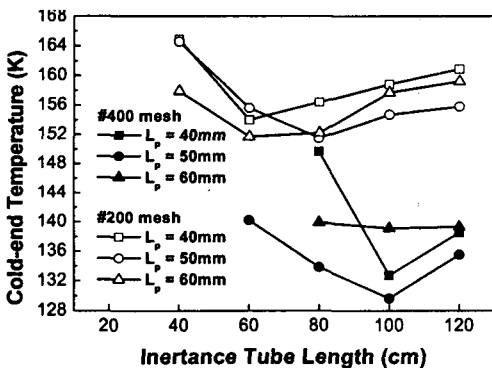


Fig. 5 Comparison of cold-end temperature for different mesh numbers.

## 4. 손실해석

### 4.1 손실체계

맥동관 냉동기에서 발생하는 주요 손실은 압력

강하에 의한  $PdV$  일손실, 재생기의 비유용도에 의한 열손실, 재생기 벽면 및 맥동관 벽에서의 전도 열손실, 재생기의 재생물질에 의한 축방향 열손실, 그리고 맥동관에서의 셔틀 열손실(shuttle loss)로 구분할 수 있다.

재생기의 비유용도에 의한 손실은 다음과 같이 정의할 수 있다.<sup>(10,11)</sup>

$$\dot{Q}_{ineff} = I_e \bar{m} C_p (T_h - T_l) \quad (1)$$

여기서  $\bar{m}$ 은 반 사이클당 재생기를 통과하는 질량유량의 평균값이다.

또한, 재생기의 관벽을 따라 흐르는 전도 열손실은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_{cond} = K_l A_{reg} \frac{T_h - T_l}{l_r} \quad (2)$$

여기서,  $A_{reg}$ 는 관 단면의 둘레면적이다.

그리고 재생기의 재생물질에 의한 축방향 열손실은 재생물질 사이의 접촉저항을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{matrix} = C_{ff} K_{ss} (1 - e_v) A_r \frac{T_h - T_l}{l} \quad (3)$$

여기서,  $C_{ff}$ 는 접촉 저항을 고려한 변수로서 약 0.1의 값을 가진다.<sup>(10)</sup>

마지막으로 맥동관에서의 셔틀 열손실은 다음과 같이 팽창부의 이상적인  $PdV$  팽창일의 비율로 표시할 수 있다.<sup>(12)</sup>

$$\dot{Q}_{shuttle} = (1 - X) \dot{Q}_{PdV} \quad (4)$$

여기서,  $X$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$X = 1 - \frac{8M}{3(\gamma - 1)\sqrt{2}\beta_{hot}} \times \frac{1 - \left(\frac{T_l}{T_h}\right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{3(\gamma-1)}{4} \tan^{-1} \frac{t}{M}} \left(\frac{1}{M^2} + 1\right)^{\frac{3(\gamma-1)}{8}}}{\int_0^1 e^{-\frac{3(\gamma-1)}{4} \tan^{-1} \frac{t}{M}} \left(\frac{t}{M^2} + 1\right)^{\frac{3(\gamma-1)}{8} - 1} dt}$$

위 식에서,

$$\beta_{hot} = \frac{r_p}{(\alpha/\omega)}, \quad M = \frac{u_A}{u_C}, \quad u_C = \omega R_{pr} \frac{l_p}{\gamma}$$

따라서, 위의 값들로부터 냉각용량을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_{PdV} - \dot{Q}_{ineff} - \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{matrix} - \dot{Q}_{shuttle} \quad (5)$$

### 4.2 손실 해석결과 분석 및 실험결과 비교

손실 해석의 계산결과는 순수하게 단일 해석을 수행하고, 계산된 저온부 온도로서 손실들을 계산한 것이다. Fig. 7은 재생기 망 치수번호가 200인 경우에 대하여 실험결과와 계산결과를 비교한 것으로서, 계산결과 역시 관성관의 길이에 따라 최저 도달온도는 최적점을 기준으로 2차 곡선 형태를 보임을 알 수 있다. 이는 동일한 길이의 맥동관에 대해 최적점을 기준으로 관성관의 길이가 길어질수록 관성관 내의 저항이 증가하고, 이에 따라 냉동기 내의 질량유량이 감소하므로 냉각효과가 저하되기 때문이다. 이러한 사실은 Fig. 8에서도 확인할 수 있다. Fig. 8은 맥동관의 길이가 50 mm인 조건에 대해서 관성관의 길이변화에 따른 냉동기 각 부분의 손실을 계산한 결과로서, 최적점을 기준으로 관성관의 길이가 증가하면 질량유량의 감소로 인해  $PdV$  팽창일이 감소하는

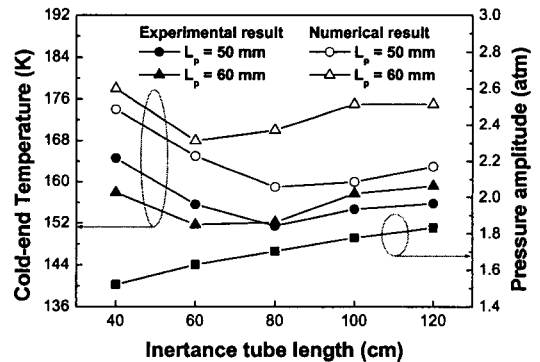


Fig. 7 Comparison of cold-end temperature between experimental and numerical results.

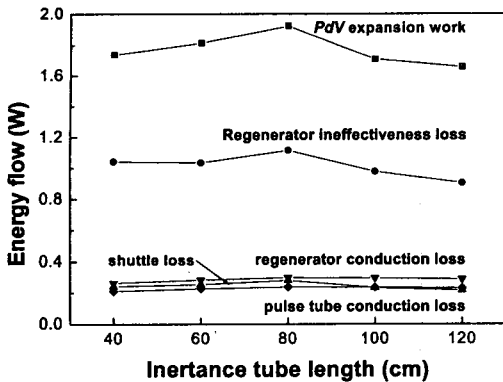


Fig. 8  $PdV$  work and loss calculation for different inertance tube lengths (pulse tube length: 50 mm).

것을 확인할 수 있다. 즉,  $PdV$  팽창일의 감소에 따라 냉동효과가 저하되는 것이다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 7의 압력분포에서 보듯이 관성관의 길이가 증가하면 압력진폭이 커져서  $PdV$  팽창일을 증가시키는 방향으로 작용하지만, 대신 관성관의 저항이 커져서 질량유량이 감소하므로  $PdV$  팽창일은 오히려 작아지게 된다. 반대로 최적점을 기준으로 관성관의 길이가 짧아지면 저항이 줄어들어 질량유량이 증가하는 효과가 발생하지만, 대신 Fig. 7에서 보듯이 압력진폭의 크기가 작아지므로  $PdV$  팽창일은 감소하게 되고, 따라서 냉동효과가 저하되는 것이다. 즉, 맥동관 냉동기의 성능은 질량유량과 압력진폭, 각 부분의 손실 등을 고려해 분석할 수 있고, 이러한 여러 가지 인자들에 의해 최적의 냉동기 성능을 보이는 맥동관 길이와 관성관 길이가 존재함을 알 수 있다. 아울러 이러한 손실 해석을 통해 맥동관 냉동기의 설계시 최적의 성능을 보이는 맥동관과 관성관 길이를 예측할 수 있다.

또한 Fig. 8의 결과를 보면, 재생기 벽면 및 맥동관 벽에서의 전도 열손실, 맥동관에서의 셔틀 열손실 등의 손실에 비해 재생기의 비유용도에 의한 손실이 상대적으로 큰 값을 나타낸다. 이 결과는 3.3절에서 설명한 비유용도 손실의 효과가 지배적이라는 사실을 뒷받침하는 결과이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 소형 선형 압축기를 이용하여

소형 관성관형 맥동관 냉동기를 제작하여 불용체적의 변화, 운전 주파수, 충전압력, 관성관 및 맥동관의 형상, 재생기 망 치수번호(mesh number)의 변화 등의 인자가 관성관형 맥동관 냉동기의 냉동능력에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 또한 손실 해석을 통해 최적조건에 대한 해석을 수행하였다. 실험결과와 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 불용체적이 감소하면 냉동기 내의 압력진폭이 증가하여 냉동기의 최저 도달온도는 감소한다.

(2) 적절한 운전 주파수(45 Hz)와 충전압력(20 atm)에서 운전 주파수가 압축기의 고유 주파수와 일치하면, 냉동기는 최대의 성능을 보인다.

(3) 재생기 망 치수번호가 증가하면 비유용도 손실의 감소에 따라 냉동기의 최저 도달온도는 감소한다.

(4) 최적의 성능을 보이는 맥동관과 관성관의 길이가 존재함을 확인하였으며, 그 조건을 손실 해석을 통해 분석하고, 최적조건의 예측 가능성을 제시하였다.

## 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술 개발사업단(2004-005-03-01)의 재정적인 도움으로 수행되었습니다. 또한 본 실험이 가능하도록 소형 선형 압축기를 제공해 주신 한국기계연구원의 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Gifford, W. E. and Longworth, R. C., 1963, Pulse tube refrigerator, ASME paper, No. 63-WA-290.
- Mikulin, E. I., Tarasov, A. A. and Shkebyonok, M. P., 1984, Low temperature pulse tube refrigeration, *Advanced in Cryogenic Engineering*, Vol. 29, pp. 629-637.
- Kanao, K., Watanabe, N. and Kanazawa, Y., 1994, A miniature pulse tube refrigerator for temperature below 100 K, *Cryogenics* 34 (ICEC suppl.), pp. 167-170.
- Zhu, S. W., Zhou, S. L., Yoshimura, N. and

- Matsubara, Y., 1997, Phase shift effect of the long neck tube for the pulse tube refrigerator, *Cryocoolers* 9, pp.269-278.
5. Roach, P.R. and Kashani, A., 1998, Pulse tube coolers with an inertance tube: theory, modeling, and practice, *Advanced in cryogenic engineering*, Vol. 43B, pp.1985-1993.
  6. Bitterman, A. and Brody, S., 1998, Pulse tubes gain foothold in cryocooler markets, *Superconductor & Cryogenics*, pp.12-18.
  7. Nam, J.W., Nam, K.W. and Jeong, S., 2004, Experiment and adiabatic analysis of miniature inertance pulse tube refrigerator, *Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, Vol.6, No.1, pp.53-58.
  8. Kim, H.S., Nam, J.W. and Jeong, S., 2003, An experimental study on miniature inertance pulse tube refrigerator, *Proceeding of the SAREK 2003 Winter Annual Conference*, pp.14-19.
  9. Urieli, 1984, *Stirling Cycle Engine Analysis*, Adam Hilger Ltd. Bristol.
  10. Ackermann, R.A., 1997, *Cryogenic regenerative heat exchangers*, Plenum Press, New York and London.
  11. Barron, R.F., 1985, *Cryogenic systems*, Oxford University Press, New York & Clarendon Press, Oxford.
  12. Jung, J. and Jeong, S., 2003, Surface heat pumping loss in pulse tube refrigerator, *Cryocoolers* 12, pp.371-378.