

# 개방관형과 밀폐관형 열음향 냉동기의 1차 하모닉에 관한 특성 연구

송규조, 박종호\*, 고득용\*\*, 박성제\*\*, 김효봉\*\*, 정철진\*\*\*  
충남대 대학원, 충남대 기계공학과\*, 기계연구원\*\*, 한양대 대학원\*\*\*

## An Experimental Study on the 1st Harmonic Characteristic for open-tube-type and close-tube-type Thermoacoustic Refrigerators

Kyu Joe Song, Jong Ho Park\*, Deuk Yong Koh\*\*, Seong Je Park\*\*,  
Hyo Bong Kim\*\*, Chul Jin Jeong\*\*\*

Chung Nam National University Graduated School, Chung Nam National University  
Mechanical Engineering\*, KIMM\*\*, Hanyang University Graduated School\*\*\*

e-mail: aina@hanmir.com

**Abstract** - In this study, The experimental open-tube-type and close-tube-type thermoacoustic refrigerator were constructed. The resonant characteristics of a thermoacoustic refrigerator were investigated. In order to determine the optimum resonant tube length and frequency, We changed the length of resonant tube from 400mm to 850mm and the frequency from 100Hz to 1000Hz. In case of first harmonic, The temperature difference of open-tube-type (1/4 wave) refrigerator was 41°C(resonator length :500mm). The temperature difference of close-tube-type (1/2 wave) refrigerator was 43°C(resonator length :850mm). In this experiments, The experimental 1/2 wave refrigerator is slightly cooler than the experimental 1/4 wave refrigerator.

### 1. 서 론

열음향 냉동기는 주로 관의 음향공명으로 구동하기 때문에 공명 맥동관 냉동기(resonant pulse tube refrigerator)라고 부르기도 한다. 1975년 Merkli [1]는 막힌 관에 기류를 주입하여 관내의 기체를 맥동하게 한 Hartmann-Sprenger관의 폐관 쪽에서 온도가 상승하는 이유를 연구하다 기류 대신 피스톤을 사용하여 관내 기체를 강제 왕복운동을 시켰을 때 피스톤의 속도가 빨라짐에 따라서 공명 주파수에 근접하는 것을 알았다. 부차적인 실험으로부터 압력변화가 최대인 양끝에서 관 벽은 열을 받아 온도가 상승하였고 중간 부근 관 벽은 냉각되어 온도가 하강하는 것을 알았다. 이때 공명관내의 가스의 진동수는 빠르기 때문에 가스관 벽 사이 열 전달은 극히 적어 냉동량 또한 크지 않았다.[2] 이러

한 현상들이 기본적인 열음향 냉동현상들이며 초기의 열음향 냉동기들은 공명기의 직경이 단지 열 침투깊이의 수배에 달할 정도로 작았기 때문에 냉동효과 또한 작았다. 대구경 공명기, 적판과 더불어 열교환기를 장치하여 전체적인 냉동력 향상을 가져온 것은 1960년 Robert L. Carter의 열음향 엔진부터이다. 120년 전 Rayleigh에 의하여 열음향 현상의 이론적 이해를 통한 발전이 이루어졌지만 정확한 열음향이론은 Rott[3]에 의해 1970년에 와서야 비로소 정립되었다. Wheatley[4]는 공명관에 적판(stack)을 설치하여 기체와 적판 사이의 열전달 이완시간을 공명 주파수와 거의 같게 함으로서 냉동량을 증가시켰다. Wheatley냉동기 제원은 지름 39mm, 적판의 두께가 0.067mm인 판형으로 판사이의 간격은 0.38mm이다. 평균압력은 약 10기압, 압력 진폭은 평균 압력의 0.034배, 주파수가 516Hz일 때 최저온도는 -78°C이었다. 국내에서도 박 등[5]이 열음향에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있으나 외국에 비하면 아주 미흡한 실정이다.

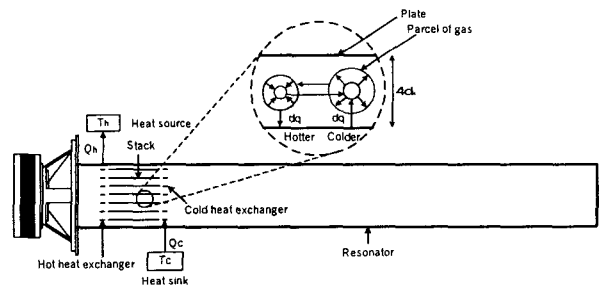


Fig. 1. Schematic diagram of close-tube type Thermoacoustic refrigerator.

따라서 열음향 냉동기를 본격적으로 제작하기 앞서 예비실험 차원으로 본 논문에서는 개방관형과 밀폐관형 열음향 냉동기의 성능을 좌우하는

최적 구동 주파수와 적판의 길이 및 위치에 대한 냉동효과를 찾을 목적으로 간략화 된 실험용 개방관형과 밀폐관형 열음향 냉동기를 제작하고 구동 주파수를 100Hz에서 1000Hz까지 변화시키면서 주파수에 따른 온도거동과 길이가 다른 적판의 공명관 내 위치에 따른 온도변화를 고찰하여 서로 비교하였다.

## 2. 열음향 냉동기의 작동원리

본격적으로 열음향 냉동기가 제작된 것은 1980년대 Los Alamos National Laboratory의 Hofler에 의해서였다. 그림 1은 밀폐관형 냉동기의 개략도로써 적판을 따라서 기체가 진동할 때 온도변화를 동반하게 되는데 온도변화의 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창이며 부원인은 적판으로의 열전달 결과이다. 기체입자의 온도는 정재파로 인한 단열 압축에 의해 국소 판 온도 이상으로 상승하기 때문에 왼편의 기체입자는 적판으로 열을 방출한다. 반면 열을 방출한 기체입자는 음파의 종진동에 의한 위치 이동으로 단열 팽창 되면서 국소 판 온도 이하로 하강하기 때문에 오른쪽 기체입자와 같이 적판으로부터 열을 흡수한다. 그런 식으로 입자들은 각 미소 사이클들 간에 열교환과 열전달을 하면서 고온 열교환기에서  $Q_h$ 를 방출하고 저온 열교환기에서  $Q_c$ 를 흡수하면서 적판을 따라 온도구배를 형성하게 된다. 기체 입자는 음파의 저압위상동안 열적 팽창을 하고 고압위상동안 열적 수축을 하기 때문에 입자는 정재파로부터 음향일을 흡수한다. 저음스피커에 의해 발생한 음향동력  $W$ 는 적판에서 기체입자들에 의해 흡수된다. 밀폐관형 냉동기가 구동할 때 압력배는 관의 양 끝에 위치하고 압력 절점은 공명기 중간부에 위치하며 개방관형 냉동기 구동시에는 압력배는 스피커부근 관 초입에 위치하고 압력 절점은 구공명기 부근 관 말단에 위치한다. 열음향 냉동기 성능에 영향을

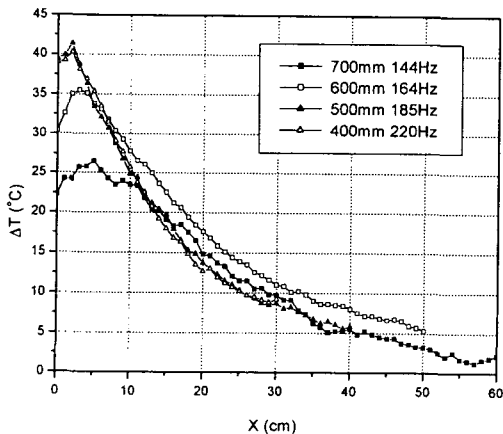


Fig. 2.  $\Delta T$  profiles with resonator length according to X axis. ( $\lambda/4$ , 1st Harmonic)

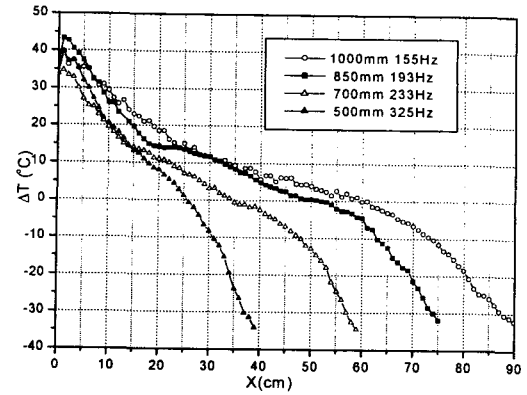


Fig. 3.  $\Delta T$  profiles with resonator length according to X axis. ( $\lambda/2$ , 1st Harmonic)

미치는 중요한 인자인 적판 간의 간격은 열음향 기관과 마찬가지로 열 침투깊이 ( $\delta_x$ )의 4배정도로 하면 최대 효율을 얻을 수 있으며, 적판에서 정상상태에서 판 표면에서 미끄러지는 깊이를 나타내는 점성 침투깊이  $\delta_v$ 만큼 적판 사이의 공간에서 상당한 점성 전단이 발생한다. Prandtl  $\sigma (= \mu c_p / \alpha = \delta_v^2 / \delta_x^2)$  수는 점성의 함수이기 때문에 낮으면 열음향 측면에서는 더 높은 효율을 기대할 수 있다.[6] 공명관 내 정상파에 의하여 발생하는 온도차를  $\Delta x \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ ,  $\delta_x$  and  $\delta_v \ll d_g$ ,  $\nabla T \ll T_m$  가정 하에서 Wheatley [7] 등이 계산한 식은 다음과 같다.

$$\nabla T = \left( \frac{1}{4} \frac{P_o^2 \delta_x (1 + \sqrt{\sigma})}{\rho_m c [(K_p d_p + K_g d_g) / \Delta x] (1 + \sigma)} \sin 2kx \right) \times \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{P_o^2 \delta_x (1 - \sqrt{\sigma})}{[(K_p d_p + K_g d_g) / \Delta x] \rho_m \Delta x T_m} \right) \times \frac{\omega(\gamma - 1)(1 - \sigma^2)}{(1 - \cos 2kx)}^{-1} \quad (1)$$

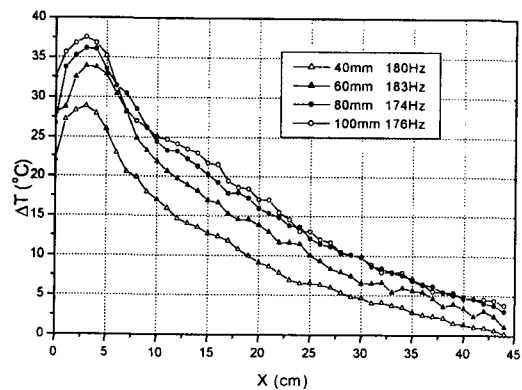


Fig. 4.  $\Delta T$  profiles with stack length according to X direction. ( $\lambda/4$ , 1st Harmonic)

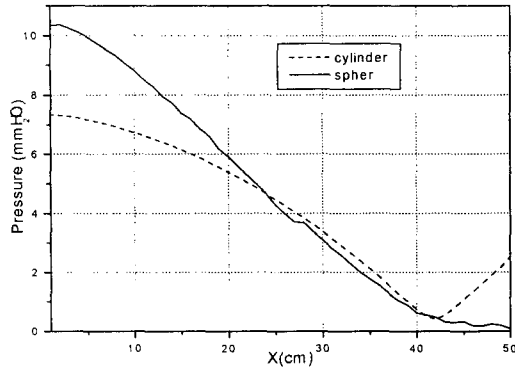


Fig. 5. Pressure profiles according to Resonator length.

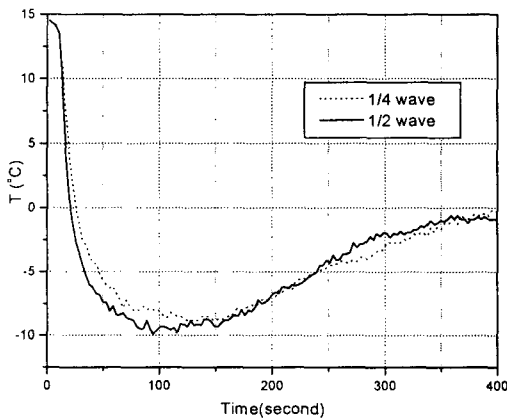


Fig. 6. Temperature profiles at cold part according to time.

### 3. 실험결과 및 고찰

밀폐관과 개방관을 따라 정현파를 증폭하여 스피커를 진동시키면 음파의 발생에 따라 압력이 밀한 부분과 소한 부분으로 배 와 마디를 형성하게 된다. 개방관형 냉동기는 공명관을 작동주파수의  $1\lambda/4$ ,  $3\lambda/4$ 로 구동하게 설계되어 있으며 스피커 쪽에 압력배가 개방관 쪽에 압력마디가 형성이 된다. 밀폐관형 냉동기는 공명관을 작동주파수의  $1\lambda/2$ ,  $2\lambda/2$ 으로 구동하게 설계되었으며, 압력 배는 스피커와 공명기의 말단 부에 위치하고 압력 절점은 공명기의 중간 부근에 위치함으로써 개방관형 냉동기와는 구조적으로 판이하게 되어있다.

그림 2는 개방관형 열음향냉동기를 사용한 공명관들의 1차 하모닉 대 온도차를 보여주고 있다. 각 공명관 온도차는  $x=20\text{mm}$ 에서  $x=50\text{mm}$ 까지의 영역에서 최대치를 보이고 있

으며 스피커에 근접할 수 록 압력은 최대이지만 입자의 진동변위는 최소가 되기 때문에 열펌핑 작용이 효율적으로 일어나지 않는다. 500mm 공명관에는 최대온도차인  $41^\circ\text{C}$ 를 보이고 있으며 공명관의 길이가 길어지면 최대온도차가 작게 나타나며, 개방관 쪽으로 가면서 온도차 또한 감소함을 알 수 있다.

그림 3는 개방관형 열음향냉동기를 사용한 공명관들의 1차 하모닉 대 온도차를 보여주고 있다. 반 파장 공명관은 중간에서 압력이 최소이고 양단에서 압력이 최대이기 때문에 관 중앙을 정점으로 하여 대칭의 온도 이력을 나타내고 있다. 각 공명관 온도차는 음향 구동부 부근과 관 끝 부근의 영역에서 최대온도차를 보이며 850mm 공명관에서  $43^\circ\text{C}$ 의 최대온도차를 보이고 있는 것을 알 수 있다.  $x=20\text{mm}$ 에서  $x=30\text{mm}$ 까지 최대 온도차가 발생하는데 서로 위상이  $90^\circ$ 인 압력과 변위속도가 절충되면서 열을 함유한 적판 내의 공기 입자와 적판들 간의 열전달이 최대가 되기 때문이다..

그림 4는 개방관형 공명관을 사용하여 실험한 결과이다. 1차 하모닉 영역에서 100mm, 80mm, 60mm, 40mm길이의 적판을 각각 사용하였고 실험결과 온도차는  $x=30\text{mm}$ 에서 적판의 길이에 관계없이 최대치를 보여 최대 효율의 열펌핑이 행해지는 것을 보여주고 있다. 적판의 길이가 100mm 일 때 최대온도차인  $38^\circ\text{C}$ 의 온도차를 보이고 있다. 적판이 짧을수록 적판에 내재하는 파수가 작아져서 사이클을 이루고 열을 펌핑하는 능력이 약해지기 때문에 온도차 또한 감소한다.

그림 5는 개방관형 냉동기에서 개방관 조건을 만들어 주는 공명통에 대하여 압력실험 한 결과이다. 점선은 PVC통의 경우로 Wheatley의 냉동기 공명통과 유사하며 공명관 내 최대압력은  $7.3\text{ mmHg}$ 이 발생하였다. 실선은 아크릴제 구의 경우로서 Hofler의 냉동기 공명통과 유사하며 공명관내 최대 압력은  $10.3\text{ mmHg}$ 이 발생하였다. 실험결과 전자의 PVC 공명통이 확대된 관으로 작용하고 있음을 알 수 있었다. 그것은 주파수를 바꾸어서 여러 번 실험한 결과 공명관 끝에서 최소압력지점이 발생하지 않은 것으로 알 수 있다. 후자는 헬름홀츠 공명통을 잘 모사하고 있으며 공명관 끝에서 최소압력이 발생하고 있다. 500mm 공명관을 사용하고 아크릴 구를 장착하고 실험하였을 경우 163Hz에서 최대 온도차가 발생하였는데 계산상으로 500Hz 공명관에서의 공명주파수가 163.46Hz으로 구공명기가 개방조건을 재대로 수행하고 있음을 알 수 있다. PVC관을 사용한 실험에서는 185Hz에서 최대온도차가 발생하고 있다.

그림6은 개방관형 냉동기에 대해 길이 100mm의 적판과 500mm 공명관을 사용하여 공명관  $x=20\text{mm}$ 위치에 적판을 설치하고 구동

주파수 185Hz로 120W의 동력을 가하였을 때 시간에 따른 저온부의 온도이력을 점선으로 표시하고 밀폐관형 냉동기에 대해서는 가장 큰 온도차를 보인 길이 100mm의 적판과 850mm 공명관을 사용하여 공명관 초입 10mm위치에 적판을 설치하고 구동 주파수 193Hz로 120W의 동력을 가하였을 때 시간변화에 따른 저온부의 온도이력을 실선으로 도시하여 비교한 것이다. 개방관형 냉동기인 경우 약 120초 후에 최저 온도  $-8^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었으며 밀폐관형 냉동기인 경우 약 100초 후에 최저 온도 약  $-9^{\circ}\text{C}$ 를 나타내었다. 실험조건에서 장치에 단열을 하지 않고 고온부의 열과 작동유체인 공기에 함유되어 있는 습기를 제거하지 않았기 때문에 적판 저온부 결로현상으로 인한 유동방해와 구동 스피커의 보이스코일의 주울 열이 증가로 저온부의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

1차 하모닉에 대해서 밀폐관형과 개방관형 열음향 냉동기의 공명관 변화에 따른 최적구동 주파수, 그리고 적판의 길이와 위치 변화에 대한 최적조건을 찾기 위한 실험연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개방관형 냉동기로 행한 1차 하모닉 실험에서 적판이 길수록 적판 내 파수가 많아 열을 펌핑하는 능력이 커지기 때문에 100mm 적판에서 가장 큰 온도차를 보인다.
- (2) 스피커동력이 10W일 때 개방관형 냉동기 경우 500mm 공명관에서 밀폐관형 냉동기인 경우 850mm 공명관에서 가장 큰 온도차를 보였다.
- (3) 공명통으로 구를 사용하면 관의 공명주파수에 접근하면서 더 나은  $\lambda/4$  개방관 역할을 한다.

(4) 공기를 작동유체로 사용할 때 적판 내 서리의 발생 열용량을 증가시키면서 저온부 온도를 증가시키기 때문에 건공기를 사용해야 cool down 온도를 유지할 수 있다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Merkli. P. and Thomann. H., "Thermoacoustic Effects in a Resonant Tube", *J. Fluid Mech.*, Vol.70, pp.161,1975.
- [2] Rott, P., "The Heating Effect Connected with Non-linear Oscillations in A Resonance Tube", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, Vol.25, pp.619-634,1974.
- [3] Rott. N., "Thermoacoustic", *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.20, pp.135~175, 1969.
- [4] Wheatly, T. and Cox, A., "Natural Engines", *Phys. Today*, Vol.38, No.8, 1985.
- [5] 박종호, 우삼룡, "열음향 냉동 장치의 제작," 한국 물리학회지, Vol. 10, pp. , 1997.
- [6] Swift G.W., "Thermoacoustic Engines and Refrigerators", *Physics Today*, pp.22~28. , July 1995.
- [7] Wheatley. J., Hofler. T., Swift. G. W., and . Migliori. A., "An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.74, pp.153~170 , 1983.
- [8] Swift .G, W. 1988, Thermoacoustic Engines, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.84, No.4, pp.114 5~ 1180