

# 밀폐관형과 개방관형 열음향 냉동기의 2차,3차 하모닉에 관한 특성 연구

송규조, 박종호\*, 고득용\*\*, 박성제\*\*, 김효봉\*\*, 박영선\*\*\*  
충남대 대학원, 충남대 기계공학과\*, 기계연구원\*\*, 금오공대 대학원\*\*\*

## An Experimental Study on the 2nd,3rd 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 Jung\*\*\*

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

e-mail: aina@hanmir.com

**Abstract** - The thermoacoustic refrigerator has not only considerable possibility but also commercial usability, because it has high reliability, lower vibration, no moving part, and can easily be constructed. In order to determine the optimum resonant tube length and the frequency, the open-tube-type( $3\lambda/4$ ) and close-tube-type( $2\lambda/2$ ) thermoacoustic refrigerator were constructed. In third harmonic, The temperature difference of  $3\lambda/4$  refrigerator was  $53^\circ\text{C}$ (resonator length :400mm). In second harmonic, The temperature difference of  $2\lambda/2$  refrigerator was  $51^\circ\text{C}$ (resonator length :400mm).

### 1. 서 론

각종 냉동기에 사용되고 있는 프레온가스(CFC, Chloro Fluoro Carbon) 등의 냉매는 환경 오염원으로 사회문제가 되고 있어 2016년에 사용금지될 전망이다. 이에 대체물질과 함께 새로운 냉동기술들이 개발되고 있다. 열음향 냉동은 비교적 최근에 개발된 기술로 증기 압축식 냉동기에 비해 큰 동력을 필요로 하지 않는 저온 냉동기술 중 하나로 스피커와 같은 음향 발생장치가 기존 냉동기의 압축기로 대체되어 있으며 CFC를 냉매로 사용하는 대신에 헬륨, 아르곤 등 환경에 무해한 기체를 사용하며, 구조가 비교적 간단하여 유지 보수가 쉽고 기계적 신뢰도가 높다. 열음향 기관은 1777년 Higgins가 커다란 관에서 수소불꽃 실험을 통해 음향진동 현상을 발견하면서 시작되어 Sondhauss 등에 의해 음향진동에 대한 연구가 진행되었으며, 1956년 Putnam 등이 열음향효과를 분석하였다. 극저온 냉동장치에서 가스가 주입된 관이 상온에서 극저온에 접근할 때 매우 큰 진폭을 갖는 Taconis진동 발생에 대하여 1954년 Clement[1], 1980년 Yazaki[2]에 의해 계

속 연구되었다. Feldman[3]은 Sondhauss 진동기에 적판(stack)을 설치하여 열음향현상을 실험·분석하여 600 W의 열로부터 27W의 음향동력을 얻을 수 있었다. 1966년 Gifford[4]는 관속의 가스에 매우 낮은 주파수와 높은 진폭을 가진 압력진동에 의한 냉동효과를 제시하였으며, 1975년 Merkli[5]가 실린더 형상, 그리고 공진하는 공명관 내 최대 속도 위치에서 냉각효과가 발생하는 것을 실험하고, 공명관 내 가스의 압력변화와 유동에 의한 위상차로 온도변화가 발생하여 관속에서 열 펌핑작용이 일어남을 규명하였다. 1969년 Rott[6]에 의해 열음향 기관과 냉동기에 대한 기초적인 연구가 수행되었으며, 1983년 Wheatley[7]에 의해 열음향 냉동기의 실용화 연구가 시작되었다. 1988년 Hofler[8]는 중음 스피커를 구동기로 하고 공명관 내에 헬륨기체를 10 기압으로 충전시켜 플라스틱 적판과 구리 열교환기를 이용, 500Hz로 공진시킴으로서 영하  $70^\circ\text{C}$ 의 저온을 얻어 실용화 가능성을 보였다. 최근 선진국에서는 열음향 기관과 열음향 냉동기를 결합한 자동차용 공기조화장치, 우주선용 냉각

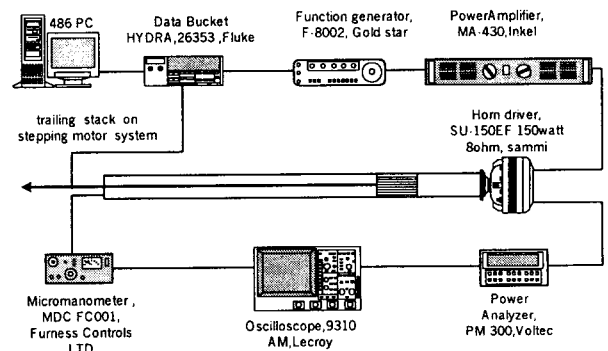


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental arrangement.(in case of 1/2wave refrigerator)

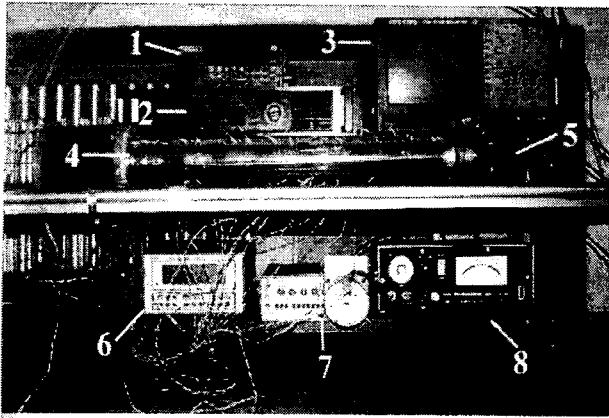


Photo. 1. Photograph of experimental apparatus (in case of 1/4wave refrigerator)

- |                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Data Aquisition System | 2. Amplifier       |
| 3. Oscilloscope           | 4. Resonator       |
| 5. Horn Driver            | 6. Power Analyzer  |
| 7. Function Generator     | 8. Micro Manometer |

기(STAR, 작동주파수 400Hz), 레이더 전파 발생 장치 냉각용, 소형 냉장고(TALSR, 작동주파수 320Hz)가 실용화되었으며, 대용량, 대규모의 열음향 냉동기의 실용화를 위하여 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 박 등[9]이 열음향에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있으나 외국에 비하면 아주 미흡한 실정이다. 따라서 열음향 냉동기의 작동을 파악하기 위하여 본 논문에서는 개방관형과 밀폐관형 열음향 냉동기의 성능을 좌우하는 최적 구동 주파수와 적판의 길이 그리고 적판의 위치에 대한 냉동효과를 찾을 목적으로 실험용 열음향 냉동기를 제작하고 구동 주파수를 100Hz에서 1000Hz까지 변화시키면서 공명관 내 생성되는 두 번째 하모닉의 공명주파수에서 온도거동을 고찰하여 서로 비교하였다. 두 번째 하모닉에서는 공명관 내에 압력최고점 부근마다 적판을 설치하면 냉동기의 효율을 상승시키는 방안이 될 수 있기 때문에 최대 온도차들의 위치는 중요하다.

## 2. 실험장치 및 방법

열음향 냉동기의 성능을 좌우하는 최적 구동 주파수와 공명관의 길이 및 적판의 길이 그리고 공명관 내 적판 위치에 대한 냉동효과를 실험하기 위하여 그림1과 사진1에 보인바와 같이 개방관형, 밀폐관형 열음향 냉동기를 제작하고 측정장치를 설치하여 실험하였다. 기존의 열음향 냉동기와는 달리 차후 헬륨을 사용하지 않는 열음향 냉동기를 개발 할 목적으로 작동유체는 공기를 사용하였으며 공명관 내부는 가압을 하지 않고 실험하였다. 음향 동력원은 고성능 확성기에 사용되는 스피커 (SU-150EF 150watt)를 사용하였으며, 공명관은 개방관형 냉동기의 경우 소직경관과 대직경관, 두 개의 부분으로 구성되

어지고 밀폐관형 냉동기인 경우에는 소직경관 하나만으로 구성되어졌다. 소직경관 공명관인 경우 적판의 위치를 쉽게 파악할 수 있고 센서의 상태 확인 및 온도 강하에 따른 현상을 파악하기 쉽게 열전도가 낮은, 내경 40mm, 외경 50mm 크기의 투명 아크릴 관으로 제작하였다. 대직경관 공명관인 경우 2개의 종류를 제작하였는데 하나는 내경 99mm 길이 140mm의 폴리 염화비닐 관으로 제작하였고, 말단부는 두께 15mm인 아크릴 판으로 되어있으며 중심에 적판 이동용 스테인레스 파이프 통과 구멍을 내었다. 다른 하나는 두께 15mm, 직경 200mm의 아크릴 반구를 두개 합쳐서 구모양을 만든 다음에 중앙에 소직경관과의 연결구멍을 만들었다. 개방관형 냉동기인 경우 말단부에 두께 10mm의 아크릴 판으로 소직경관을 밀폐하였으며 개방관형 냉동기와 같이 적판과 연동할 수 있는 스테인레스 파이프의 통과 구멍을 내었다. 소직경관 공명관 내 적판의 온도변화는 스텝모터를 사용하여 적판의 위치 및 주파수를 제어하여 관찰하였다. 적판은 0.06mm 두께의 캡톤 필름에 직경 0.37mm 뉘시줄을 3~6mm 간격으로 접착한 뒤 이것을 말아서 직경이 40mm가 되도록 하여 길이 100mm, 80mm, 60mm, 40mm의 적판 4개를 제작하여 사용하였다. 적판 양측에서 발생하는 순수한 온도를 얻기 위하여 열을 흡수하여 방출하기 위한 저·고온 열 교환기는 배제하였고 저·고온부적판에 직접 K형 열전대를 설치한 뒤 데이터 획득장치 (Fluke HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 3분의 간격을 두면서 데이터를 수집하였다. 적판에 발생하는 정상상태 도달온도는 1분이지만 스텝 모터의 작동시간이나 데이터 획득시간 등을 고려하여 충분한 시간인 3분을 단위 실험시간으로 잡았다. 냉동기에 공급한 구동 주파수는 함수 발생기(F-8002, Gold Star)를 사용하여 발생시킨 정현파신호를 증폭기(Inkel MA430)에서 증폭한 후 스피커를 구동시켰으며 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec PM300)로 측정하였다. 실험은 준비된 각각의 공명관 (1000mm, 850mm, 700mm, 600mm, 500mm, 400mm)을 사용하여 개방관형 냉동기와 밀폐관형 냉동기를 전환시켜 사용하였다. 최적 구동주파수는 각 공명관 초입에 적판은 설치한 다음 주파수를 상황에 따라 100Hz에서 1000Hz까지 약 10Hz 간격으로 변화 (sweeping)시켜 얻은 데이터를 바탕으로 다시 2Hz 간격의 주파수 변화(sweeping)를 실시하여 각 공명관에 따르는 최적 구동주파수를 찾아내었다. 공명관 내 적판 위치에 따른 온도 분포는 각 공명관에서 찾아낸 최적 냉동 주파수를 사용하였고 스피커 쪽공명관 초입을  $x=0$ 으로 기준으로 하여 공명관 말단부까지 10mm간격으로 적판의 위치를 이동시키면서 적판 양단의 온도를 측정하였다. 길이가 다른 4종류의 적판에 대하여서도 위치를 이동시키면서 적판 양단의 온도를 측정하였다

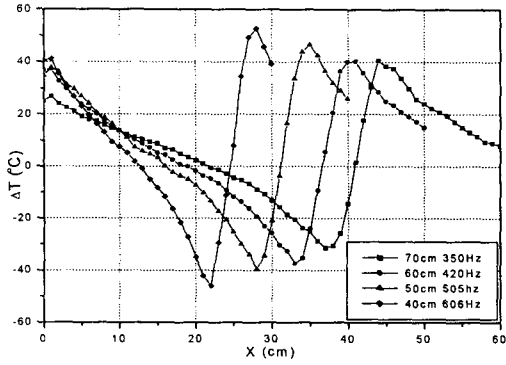


Fig. 2.  $\Delta T$  profiles with resonator length according to X axis. ( $\lambda/4$ , 3rd Harmonic)

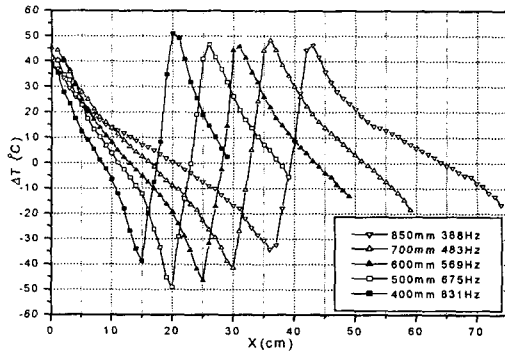


Fig. 3.  $\Delta T$  profiles with resonator length according to X axis. ( $\lambda/2$ , 2nd Harmonic)

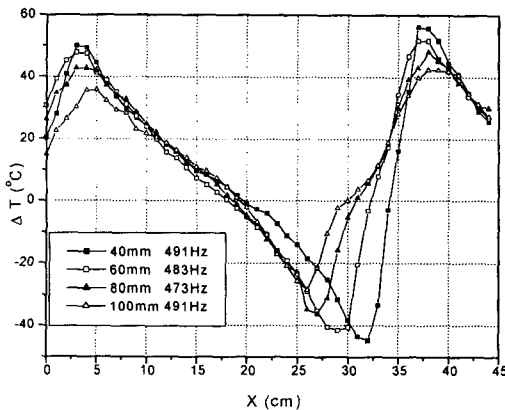


Fig. 4.  $\Delta T$  profiles with stack length according to X direction. ( $\lambda/4$ , 3rd Harmonic)

### 3. 실험결과 및 고찰

밀폐된 관을 따라 정현파를 증폭하여 스피커를 진동시키면 음파의 발생에 따라 압력이 밀한 부분과 소한 부분으로 배와 마디를 형성하게 된다.

그림 2는 개방관형 냉동기를 사용하여 3차 하

모닉(3/4파장) 영역에서 가장 큰 온도차를 보이는 주파수들의 x 방향 온도 도표이다. 실험결과 두 번째 하모닉에서는 40mm 적판에서 가장 큰 온도차를 보이는 것으로 나타났기 때문에 실험에 사용하였다. 400mm 공명관에서 최초 역전 온도점은  $x=130\text{mm}$ 에서 나타나고  $x=220\text{mm}$ 에서 역전온도점이 나타나는 700mm공명관까지 공명관의 길이에 비례하여 역전 온도점이 분포한다. 3차 하모닉에서는 400mm 공명관의  $x=280\text{mm}$ 위치에서 최대 온도차인  $52.7^\circ\text{C}$ 를 보이며 공명관의 길이가 증대 될수록 온도차는 감소하는 경향을 보인다. 3차 하모닉은 두 개의 압력배를 가지는데 스피커와 인접한 압력배보다는 공명통 근처의 배에서 더 높은 온도차를 보이는 것은 스피커에서 멀리 떨어질수록 음파가 평면파와 유사하게 발달되면서 열 펌핑 효율이 증가되기 때문이다. 스피커와 공명관이 연결되는 부분은 구조적으로 복잡하여 음파가 굴절되기 때문에 공명통 쪽 음장보다 순수하지 않다. 그림 4에서 보인 바와 같이 3차 하모닉은 1/4파장의 3개로 구성되며 단위압력 축이 3개로 구성되어 있기 때문에 그래프에서 보는바와 같이 3개의 변곡온도점을 볼 수 있다.

그림 3은 밀폐관형 냉동기를 사용하고 2차 하모닉(2/2파장) 영역에서 가장 큰 온도차를 보이는 주파수들의 x 방향 온도 도표이다. 이때 사용된 적판 역시 40mm를 사용하였다. 2차하모닉인 밀폐관에서 압력형상은 두 개의 마디를 가지며 관중간, 스피커쪽, 관말단의 3곳에서 최대 압력을 가진다. 850mm관을 예를 들어보면 스피커를 기준으로 하여 1차압력 마디는 공명관의  $x=200\text{mm}$ 지점에서 생성되고 2차압력 마디는  $x=650\text{mm}$ 지점에서 발생하는 것을 알 수 있으며 1차 압력배는  $x=20\text{mm}$ 지점에서 그리고 2차 압력배는  $x=430\text{mm}$ 지점에서 발생하며 3차 압력배는  $x=740\text{mm}$  지점에서 발생하는 것을 실험으로 알 수 있다. 온도차가 감소되기 시작하는  $x=360\text{mm}$ 지점은 첫 번째 마디에서 배로 이행되는 압력형상의 중간지점인 것을 알 수 있다. 이 도표에서도 1/4파장 공명관의 경우에서와 같이 400mm 공명관에서 최대의 온도차인  $51^\circ\text{C}$ 를 보이고 있다. 이후 공명관의 길이에 반비례하여 온도차가 감소하는 경향을 보이고 있다. 2차 하모닉은 1/2파장의 2개로 구성되며 압력 축이 4개로 구성되어 있기 때문에 그래프에서 보는바와 같이 4개의 변곡온도점을 볼 수 있다.

그림 4는 개방관형 냉동기를 사용하고 구동 주파수를 3차 하모닉 영역에서 각각의 적판에 가장 큰 온도차를 보이는 주파수들을 실험적으로 찾아내 공명관 길이방향으로 10mm씩 440mm까지 이동하며 온도차를 측정 한 뒤 최대 온도차를 이루는 주파수에 대한 온도차를 도시한 것이다. 3차 하모닉 영역에서는 1차 하모닉에서와는 달리 공명관의 구동부 쪽 30mm에서와 개방관 쪽 380mm 부근에서 최대 온도차를 보이며

30mm 부근에서 40mm 적판은 50°C, 60mm는

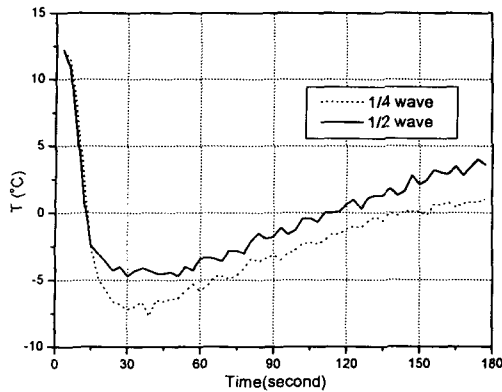


Fig. 5. Temperature profiles at cold part according to time.

48°C, 80mm는 43°C 그리고 100mm는 36°C로 적판의 길이가 짧을수록 온도차가 높게 나타남을 보이고 있다.

그림 5는 개방관형 냉동기에 대해 1차 하모닉에 대한 특성을 비교하기 위해 길이 40mm의 적판과 500mm 공명관을 사용하여 공명관 초입 20mm 위치에 적판을 설치하고 구동 주파수 185Hz로 150W의 동력을 가하였을 때 시간에 따른 저온부의 온도이력을 점선으로 표시하고 밀폐관형 냉동기에 대해서는 가장 큰 온도차를 보인 길이 40mm의 적판과 1차하모닉 실험에 쓰인 850mm 공명관을 사용하여 공명관 초입 10mm 위치에 적판을 설치하고 구동 주파수 193Hz로 150W의 동력을 가하였을 때 시간에 따른 저온부의 온도이력을 실선으로 도시하여 비교한 것이다. 개방관형 냉동기와 밀폐관형 냉동기 공히 최저도달온도시간은 약 40초이고 개방관형 냉동기인 경우 최저-7°C와 밀폐관형 냉동기인 경우 -4°C를 나타내었다. 실험조건에서 장치에 단열을 하지 않고 고온부의 열과 작동유체인 공기에 함유되어 있는 습기를 제거하지 않았으나 적판의 길이가 고온부와 상당히 근접해있기 때문에 고온부로의 빠른 전도열 때문에 급격히 온도가 상승하고있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

두번째 하모닉 대역에서 개방형과 밀폐형 열음향 냉동기의 공명관 변화에 따른 최적구동 주파수, 그리고 공명관의 길이에 따른 적판의 길이와 위치 변화에 대한 최적조건을 찾기 위한 실험 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개방관형 냉동기의 두 번째 하모닉 대역에서 40mm 적판이 가장 큰 온도차를 보인다

(2) 두 번째 하모닉 대역에서 개방관형 냉동기 경우 400mm공명관, 606Hz에서 가장 큰 온도차인 53°C를 보였으며 밀폐관형 냉동기 경우 400mm공명관, 831Hz에서 가장 큰 온도차인 51°C를 보였다.

(3) 개방관형 냉동기에서 최소 압력지점은 각 공명관에 대해 31.5%지점이고 최대 압력지점은 61%지점이다.

(4) 밀폐관형 냉동기에서 공명관 내 첫 번째 압력 마디는 약22% 지점이고 두 번째 압력마디는 50%지점이다. 압력 배는 공명관 처음과 끝 그리고 46% 지점이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Clement. J. R. and Gaffne. J. Y., "Thermal Oscillations in Low Temperature Apparatus," Adv. Cryog. Eng., Vol. 1, pp. 302, 1954.
- [2] Yazaki. T., Tominaga. A., and Narahara. Y., "Experiments on Thermally Driven Acoustic Oscillations of Gaseous Helium," J. Low Tim. Phys., Vol. 41, pp. 45, 1980.
- [3] Feltman. K. T., Jr., "Review of The Literature on Sondhauss Thermo-Acoustic Phenomena," J. Sound Vib., Vol. 7, pp. 71, 1968.
- [4] Gifford. W. E and Longthworth. R. C., "Surface Heat Pumping," Adv. Croyg. Eng., Vol. 11, pp. 171, 1966.
- [5] Merkli. P. and Thomann. H., "Thermo-acoustic Effects in a Resonant Tube," J. Fluid Mech., Vol. 70, pp.161, 1975.
- [6] Rott. N., "Thermoacoustic," Z. Angrew. Math. Phys., Vol. 20, pp. 135~175, 1969.
- [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] Hofler. T. J., "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance," Ph. D. dissertation at University of California, San Diego, 1986.
- [9] 박종호, 우삼룡, "열음향 냉동장치의 제작," 한국 물리학회지, Vol. 10, pp. 181~185., 1997.