

개방관과 밀폐관의 열음향 효과에 관한 하모닉 특성 연구(1)- 1차 하모닉

An Experimental Study on the Characteristics for Open-Tube and Close-Tube Thermoacoustic Effects(1) - The 1st Harmonic

송규조*, 이성노**

Kyu Joe Song*, Sung Ro Lee**

Abstract: In this study, the experimental open-tube and close-tube thermoacoustic apparatuses were constructed. In order to determine the optimum length of resonant tube, frequency and the optimum length of stack, the resonant characteristics of thermoacoustic apparatuses were investigated. The length of resonant tube varies from 400mm to 850 mm. The experimental frequency varies from 100 Hz to 1000 Hz. In case of first harmonic, the maximum temperature difference of the open-tube thermoacoustic apparatus is 41 °C (resonator length :500 mm), and the maximum temperature difference of the close-tube thermoacoustic apparatus is 43 °C (resonator length :850 mm).

Key Words: Thermoacoustic, Harmonic Frequency, Stack, Acoustic Pressure

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 배관 쪽에서 온도가 상승하는 이유를 연구하다 기류 대신 피스톤을 사용하여 관 내 기체를 강제 왕복운동을 시켰을 때 피스톤의 속도가 빨라짐에 따라서 공명 주파수에 근접하는 것을 알았다. 계속된 실험으로부터 압력변화가 최대인 양끝 관 벽은 열을 받아 온도가 상승하고 중간 부근 관 벽은 냉각되어 온도가 하강함을 밝혀냈다. 이때 공명관 내 가스의 진동수는 빨라졌기 때문에 가스와 관 벽 사이 열 전달은 극히 적어 냉동량 또한 크지 않았다. [2] 이러한 현상들이 기본적인 열음향 냉동현상들이며 초기의 열음향 냉동기들은 공명기의 직경이 단지 열 침투깊이의 수배에 달할 정도로 작았기 때문에 냉동효과 또한 작았다. 대구경 공명관, 석판, 열교환기 등을 장치하여 전체적인 냉동력 향상을 가져온 것은 1960년 Robert L. Carter[3]의 열음향 엔진부터이다. Wheatley[4]는 공명관에 적판(stack)을 설치하여 기체

와 적판 사이의 일정한 이완시간을 공명 주파수와 거의 같게 함으로써 냉동량을 증가 시켰다. Wheatley냉동기 제원은 지름 39mm, 적판의 두께는 0.067mm인 판형으로 판사이의 간격은 0.38mm이다. 평균압력은 약 10기압, 압력 진폭은 평균 압력의 0.034배, 주파수가 516Hz일 때 최저온도는 영하 78°C이었다. 1988년 Hofer[5]는 실용화를 위한 냉동기 성능 연구에서 공명기 내에 헬륨기체를 10기압으로 충전하고 중음 스피커를 사용하여 500Hz로 공진시킨 뒤 플라스틱 적판과 구리 열교환기를 이용하여 영하 70°C의 저온을 얻었다. 그 외 펜실바니아 대학에서는 1992년에 Garrett [6]이 118°C의 온도차를 낼 수 있는 우주 왕복선용 Space Thermoacoustic Refrigerator (STAR)을 제작했고 1995년에는 USS Deyo호 레이더 냉각용 Shipboard Electronics Thermoacoustic Chiller (SETAC)을 제작하기도 하였으며 1998년에는 태양열을 이용하여 120db의 음향을 발생시키는 열음향기관을 제작하기도 하였다. 국내에서도 박종호[7]가 열음향에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있으나 국내에서 제작된 열음향 냉동기의 성능은 미흡한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 열음향 냉동기를 본격적으로 제작하기에 앞서 예비실험 차원으로 개방관과 밀폐관에서 일어나는 하모닉 특성을 열음향 현상과 연계하여 실험하였다. 1/4파장의 개방조건을 만들어 주는 아크릴 공명구와 PVC 공명통을 사용하여 어느 것이 공명 주파수에 접근하는지를 실험하였고 관길이에 따라 좌우되는 열음향 냉동기의 최적 구동 주파수와 적판의 길이 및 적판의 위치에 대한 온도차출을 실험하였다.

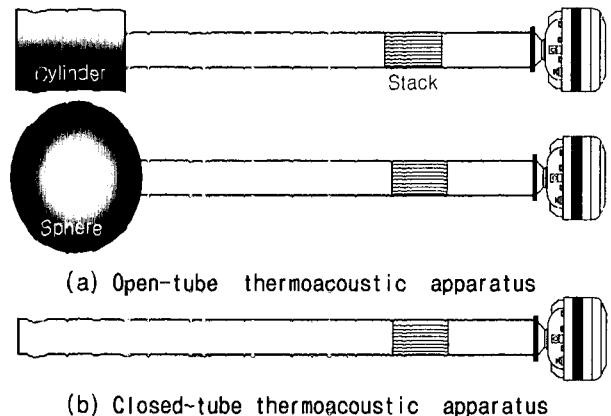


그림 1. 개방관형 열음향 냉동기와 밀폐관형 열음향 실험기

Fig. 1. Open-tube-type thermoacoustic refrigerator and closed-tube type thermoacoustic apparatus

* 학생회원 : 충남대 대학원 기계공학과 박사과정

** 비 회원 : 충남대 공대 기계공학과 교수

원고접수 : 2002년 04월 01일

심사완료 : 2002년 04월 29일

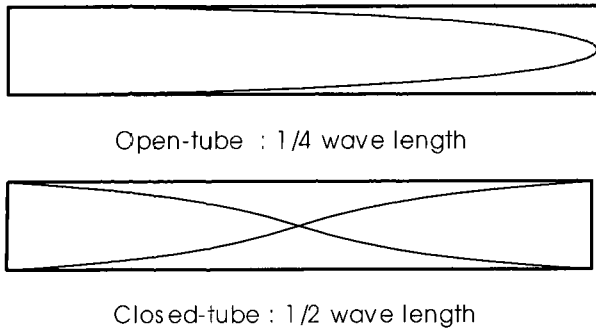


그림 2. 각 공명관의 첫 번째 조화파(압력형상)
Fig. 2. The 1st harmonic of each refrigerator

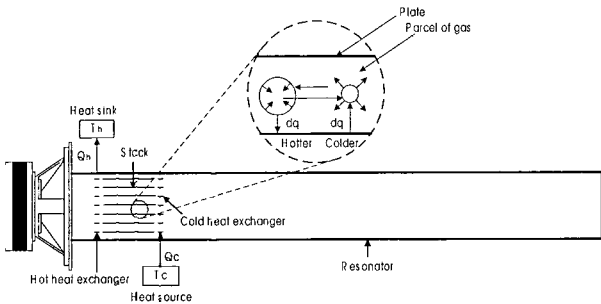


그림 3. 밀폐관형 열음향 실험기의 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of close-tube thermoacoustic apparatus.

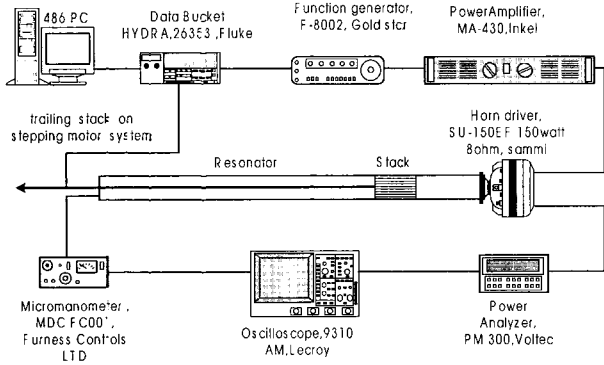


그림 4. 실험 장비도(밀폐관 열음향 실험기)
Fig. 4. Schematic diagram of the experimental arrangement.(close-tube thermoacoustic apparatus)

2. 하모닉과 열음향 원리

관에 정재파를 가진시키면 개방관은 관끝에서 압력이 최소인 지점이 나타난다. 관의 길이는 1/4파장의 홀수배와 같아지면서 기본 파장은 관길이의 4배가 되고

홀수 하모닉만이 존재하게 된다. 따라서 $L = n \frac{\lambda_n}{4}$,

$n=1,3,5$, 그러므로 1/4파장 3/4파장 5/4파장 등이 형성되게 된다. 그림 2의 상단부는 개방관의 1차 하모닉인 1/4파장을 보여주고 있다. 정재파가 인가된 밀폐관은 관끝이 최대압력 지점이다. 관의 길이는 1/2파장의 정수배와 같게 되고 기본 파장은 관길이의 2배가

되면서 정수 하모닉만 존재한다. 따라서 $L = n \frac{\lambda_n}{2}$, $n=1,2,3$, 그러므로 1/2파장 2/2파장 3/2파장 등이 형성되게 된다. 그림 2의 하단부는 밀폐관의 1차 하모닉인 1/2파장을 보여주고 있다. 개방관 열음향 실험기는 한쪽이 뚫려도 작동 가능하나 소리가 많이 나기 때문에 본 논문은 개방조건을 모사한 휘틀리형 공명통을 장착하여 주로 실험하였다.

그림 3은 밀폐관형 냉동기의 개략도로서 적판을 따라 기체가 진동할 때 온도변화를 동반하게 되는데 온도변화의 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창이며 부원인은 적판으로의 열전달이다. 기체입자의 온도는 정재파로 인한 단열 압축에 의해 국소 판 온도로 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 열전달을 하면서 고온 열교환기에서 Q_h 를 방출하고 저온 열교환기에서 Q_c 를 흡수함에 따라 적판에서 온도구배를 형성하게 된다. 기체 입자는 음파의 저압 위상 동안 열적 팽창을 하고 고압 위상 동안 열적 수축을 하기 때문에 입자는 정재파로부터 음향일을 흡수한다. 열음향 냉동기 성능에 영향을 미치는 중요한 인자인 적판 간의 간격은 열음향 기관과 마찬가지로 열 침투깊이(δ_x)의 4배 정도로 하면 최대 효율을 얻을 수 있으며, 적판 표면에서 미끌리는 깊이를 나타내는 점성 침투깊이(δ_v)만큼 적판 사이의 공간에서 상당한 점성 전단이 발생한다. Prandtl수 $\sigma (= \mu c_p / \chi = \delta_v^2 / \delta_x^2)$ 는 점성의 함수이기 때문에 낮으면 열음향 측면에서는 더 높은 효율을 기대할 수 있다.[8]

3. 실험장치 및 실험기 제작

열음향 냉동 효과의 실험을 위하여 그림 4와 그림 5에 보인바 와 같이 밀폐관 열음향 실험기와 개방관 열음향 실험기를 제작하고 측정 장치를 설치하여 실험하였다. 기존의 열음향 냉동기와는 달리 차후 헬륨을 사용하지 않는 열음향 냉동기를 개발하려는 목적으로 작동유체는 공기를 사용하였으며 공명관 내부는 가압을 하지 않고 실험하였다. 음향 동력원은 고성능 확성기에 사용되는 스피커(SU-150EF 150watt)를 사용하였다. 개방관 열음향 실험기의 경우 공명관과 공명통 두 개의 부분으로 구성되어지고 밀폐관 열음향 실험기인 경우에는 공명관 하나만으로 구성되어진다. 공명관은 적판의 위치를 쉽게 파악할 수 있고 센서의 상태 확인 및 온도 강하에 따른 현상을 파악하기 쉽게 열전도가 낮은, 내경 40mm, 외경 50mm, 길이 1000mm, 850mm, 700mm, 600mm, 500mm, 400mm의 길이가 다른 6종류의 투명 아크릴 관으로 제작하였다. 공명통은 두 종류를 제작하였는데 하나는 내경 99mm, 외경 113mm, 길이 140mm의 폴리염화비닐 관으로, 말단부는 두께 15mm인 아크릴 판으로 되어 있으며 중심에 적판 이동용 스테인레스 파이프의 통과 구멍을 내었다. 다른 하나는 두께 15mm, 직경 200mm의 아크릴 반구를 두 개 합쳐서 구모양으로 만든 다음 중앙에 공

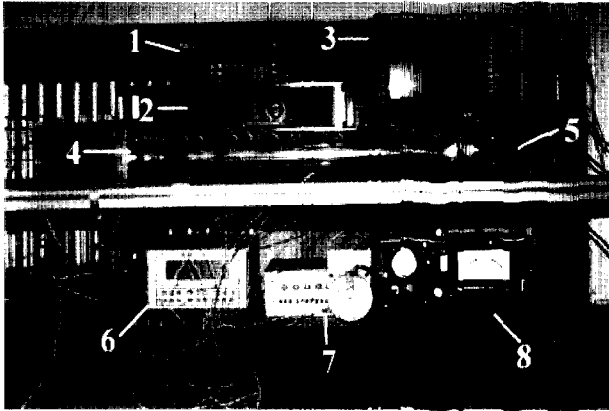


그림 5. 실험 장비(개방관 열음향 실험기)
 Fig. 5. Photograph of experimental apparatus
 1. data Aquisition System. 2. amplifier
 3. oscilloscope 4. resonator
 5. horn Driver 6. power Analyzer
 7. function Generator 8. micro Manometer

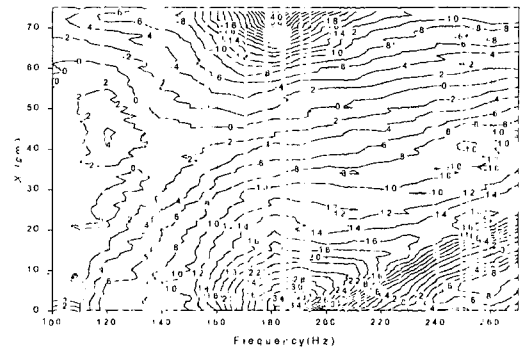


그림 7. 밀폐관 열음향 실험기에서 1차 하모닉의 온도차 분포
 Fig. 7. Contour of temperature difference at the 1st harmonic.(close-tube thermoacoustic apparatus)

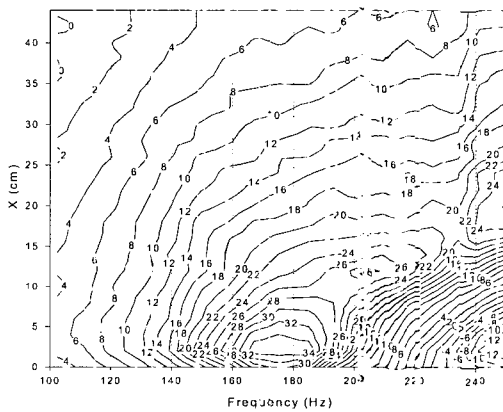


그림 6. 개방관 열음향 실험기에서 1차 하모닉의 온도차 분포
 Fig. 6. Contour of temperature difference at the 1st harmonic.(open-tube thermoacoustic apparatus)

명판과의 연결구멍을 만들고 반대편 중심에 적판 이동용 스테인레스 파이프 통과 구멍을 내었다. 밀폐관 열음향 실험기인 경우 말단부에 두께 10mm의 아크릴 판으로 공명관을 밀폐하였으며 개방관 열음향 실험기와 같이 적판과 연동할 수 있는 스테인레스 파이프의 통과 구멍을 내었다. 공명관 내 적판의 온도변화는 스텝모터를 사용하여 적판의 위치 및 주파수를 제어하여 관찰하였다. 적판은 0.06mm 두께의 캡톤 필름에 직경 0.37mm 낚시줄을 3~6mm 간격으로 집착한 뒤 이것을 말아서 직경이 40mm가 되도록 하여 길이 100mm, 80mm, 60mm, 40mm의 적판 4개를 제작하여 실험에 사용하였다. 적판의 고·저온부에 직접 K형 열전대를 설치한 뒤 데이터 획득장치(Fluke HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 3분의 간격을 두면서 데이터를 수집하였다. 그림11을 제외한 모든 실험에서 스피커동력을 10W(speaker capacity 150W)로 설정했기 때문에 공명관 내에서 정상 상태 도달 온도는 약 1분이지만 적판의 위치를 변동할 때 스텝 모터의 작동시간(10초)

이나 데이터 획득시간 (3초)등을 고려하여 여유있게 3분을 단위 실험 시간으로 잡았다. 냉동기에 공급한 구동 주파수는 함수발생기(F-8002, Gold Star)를 사용하여 정현파를 발생시킨 뒤 증폭기(Inkel MA430)에서 증폭한 후 스피커를 구동시켰으며 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec PM300)로 측정하였다.

4. 실험방법 및 결과 고찰

밀폐관과 개방관을 따라 정재파를 증폭하여 스피커를 진동시키면 음파의 발생에 따라 압력이 밀한 부분과 소한 부분으로, 배 와 마디를 형성하게 되는 것이 실험의 기본 조건이다. 하지만 주파수 변화할 해야 하는 그림 6과 7의 실험은 예외이다. 그림 10에서의 실험을 제외하면 모든 실험에서 100mm적판을 사용하였고 그림 12를 제외하고 스피커 동력은 10W로 유지하였다.

그림 6은 540mm 개방관을 사용하여 x축으로는 100Hz에서 250Hz까지 10Hz 간격으로 주파수를 변환시키면서 매 3분 간격으로 측정한 결과이며 y축으로는 공명관 길이 방향으로 적판을 1cm씩 이동시키면서 매 3분 간격으로 측정한 1/4파장, 1차 하모닉 등은 도표이다. x축으로 180Hz, y축으로 약 30mm 위치에서 약 34℃의 최대 온도 차이를 보이고 있다. 이 위치에서 열음향 진동사이클을 이루는 공기 입자와 적판 상호간에 가장 큰 열전달을 보이고 있기 때문에 저온부에서 고온부로 열이동이 큰 것을 알 수 있다. 개방관 쪽으로 간수록 음파의 압력이 작아지기 때문에 기체입자의 팽창과 수축력 또한 작아지게 되고 따라서 사이클을 이루는 입자의 일도 작아지게 되어 펌핑되는 온도가 점차 작아지게 됨을 알 수 있다. 180Hz로부터 벗어난 주파수 내 온도차는 점차 감소하고 있는 것을 볼 수 있는데 그것은 정재파가 아닌 진행파가 되기 때문에 적판에 대한 열교환을 고정 위치에서 정확하게 할 수 없게 되어 온도차가 감소한다.

그림 7은 그림 6과 동일한 방식으로 실험하였으며 850mm 밀폐 공명관을 사용하여 측정한 1/2 파장, 1차 하모닉의 등온도표이다. x축으로 약 190Hz, y축으로 약 30mm위치에서 약 34℃ 그리고 y축으로 약 740mm

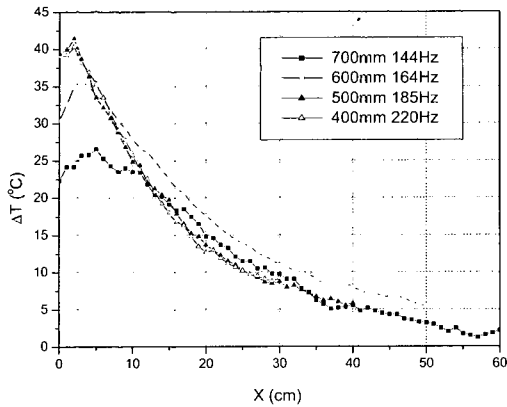


그림 8. 공명관길이에 따른 온도차선도(개방관 1차 하모닉)
 Fig. 8. ΔT profiles with resonator length according to X axis. ($\lambda/4$, 1st Harmonic)

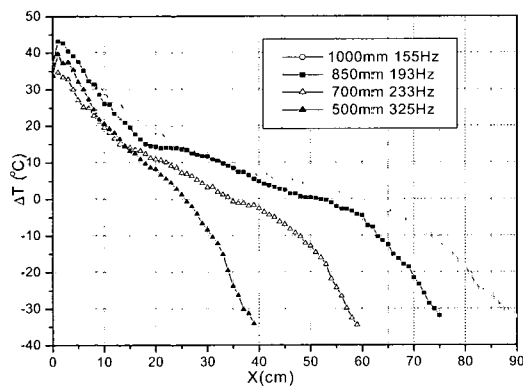


그림 9. 공명관길이에 따른 온도차선도(밀폐관 1차 하모닉)
 Fig. 9. ΔT profiles with resonator length according to X axis. ($\lambda/2$, 1st Harmonic)

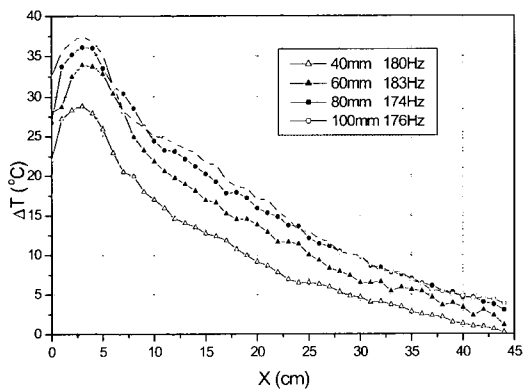


그림 10. 적판길이에 따른 온도차선도(개방관 1차 하모닉)
 Fig. 10. ΔT profiles with stack length according to X direction. ($\lambda/4$, 1st Harmonic)

에서 -40°C 온도차를 보이고 있다. 여기서 음의 부호는 고온부와 저온부의 위치가 서로 역전된 것을 의미하고 있다. 밀폐관 내에서 기체입자의 압력과 변위는 $1/2$ 파장 특성 상 공명기 중간을 기점으로 하여 대칭을 이루기 때문에 고온부와 저온부의 역전이 이루어지고 중간 부근에서는 개방관의 말단에서와 마찬가지로 압력변화가 최소가 되기 때문에 온도차가 발생하지 않는다.

그림 8은 길이가 다른 개방관들을 사용한 1차 하모닉 대 온도차를 보여주는 도표이다. 주파수 Sweeping을 하여 가장 큰 온도차를 보이는 주파수를 선택한 뒤 3분의 간격을 두면서 적판을 10mm 씩 후퇴하면서 실험한 도표이다. 각 개방관의 온도차는 $y=20\text{mm}$ 에서 $y=50\text{mm}$ 까지의 영역에서 최대치를 보이고 있으며 스피커 바로 인접한 위치에서 최대온도차를 보이지 않는 이유는 스피커에 근접할수록 압력은 최대이지만 입자의 진동변위는 최소가 되기 때문에 열팽창 작용이 효율적으로 일어나지 않기 때문이다. 500mm 개방관에서 최대 온도차인 41°C 를 보이고 있으며 관의 길이가 길어지면 최대온도차가 작게 나타나고 개방관 쪽으로 갈수록 온도차 또한 작게 나타남을 알 수 있었다.

그림 9의 실험은 그림 8과 동일한 방식으로 수행하였다. 밀폐관 실험기는 관 중앙을 정점으로 하여 대칭의 온도 이력을 나타내고 있으므로 각 공명관 온도차는 음향 구동부 부근과 관 끝 부근의 영역에서 최대 온도차를 보이며 850mm 공명관에서 43°C 의 최대 온도차를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 실험 시 같은 길이의 적판을 사용했는데 관의 길이가 짧아지면 상대적으로 적판의 길이가 길어지는 것이 되므로 저온부에서 발생하는 압력 또한 작아져서 열팽창이 잘 되지 않아 온도차가 감소한다. 반대로 관의 길이가 길어지면 적판의 길이는 상대적으로 짧아지므로 저온부에서 충분히 열을 팽팽할 수 있는 공간이 줄어들어 따라 온도차도 줄어들게 된다. 그림 8과 9의 실험에서 적정 길이의 공명관을 찾았으며 최고 온도차로 공명관 최적 길이를 알 수 있다.

그림 10은 540mm 개방관 실험기를 사용하고 100mm, 80mm, 60mm, 40mm 길이의 적판을 사용한 실험한 결과이며 그림 8과 동일한 방식으로 수행하였다. 4개의 적판 중 100mm 적판에서 최대 온도차인 38°C 의 온도차를 보이고 있다. 여기서는 적판이

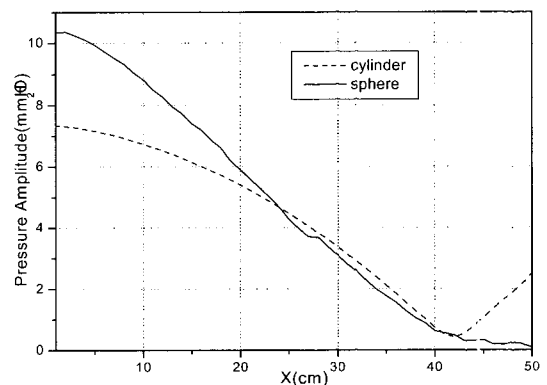


그림 11. 공명관 길이에 따른 압력형상 (개방관)
 Fig. 11. Pressure profiles according to resonator length.

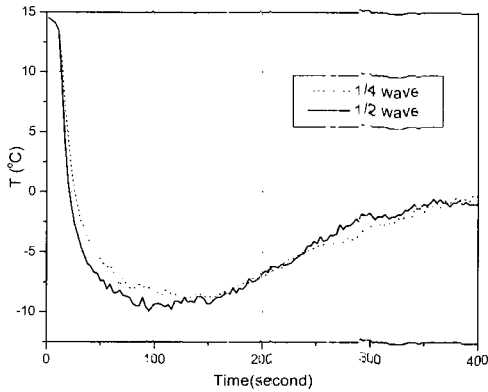


그림 12. 시간에 따른 저온부 온도형상
Fig. 12. Temperature profiles at cold part according to time.



그림 13. 적판 저온부의 착상
Fig. 13. Photograph of frost on cold part of stack.

짧을수록 적판에 내재하는 파수가 적어지므로 기체 입자의 팽창 압축 사이클 또한 적어져서 열을 펌핑하는 능력이 약해지기 때문에 온도차가 감소한다.

그림 11은 개방관 실험기에서 시스템을 밀폐할 때 개방관 조건을 만들어 주는 공명통에 대하여 압력 실험한 결과이다. 집선은 PVC 공명통의 경우로 휘틀리의 냉동기 공명통과 유사하며 공명관 내 최대 압력은 $7.3 \text{ mmH}_2\text{O}$ 이 발생하였다. 실선은 아크릴 공명구의 경우로서 Hoffer의 냉동기 공명통과 유사하며 공명관 내 최대 압력은 $10.3 \text{ mmH}_2\text{O}$ 가 발생하였다. 공명관의 증폭을 Q 값은 비활성 체적 (음향에너지저장하는 유체 체적)과 감쇠 체적의 비율로 결정된다. PVC 공명통의 경우 비활성 체적을 높여 Q 값을 향상시키려면 길이 증가로 인한 공진 주파수의 변화가 수반된다. 그러나 특정 주파수의 증폭을 위해서 구형 공명통을 사용하면 공진 주파수의 변화 없이 Q 값을 높일 수 있다. 500mm 공명관을 사용하고 아크릴 구를 장착하여 실험하였을 경우 163Hz에서 최대 온도차가 발생하였는데 계산상으로 500mm 공명관에서의 공명 주파수가 163.46Hz으로 구공명기가 관의 공명주파수와 근접하고 있음을 알 수 있다. PVC관을 사용한 실험에서는 185Hz에서 최대온도차가 발생하고 있다.

그림 12는 개방관 실험기에 대해 길이 100mm의 적

판과 500mm 공명관을 사용하여 공명관 $y = 20\text{mm}$ 위치에 적판을 설치하고 구동 주파수 185Hz로 120W의 동력을 가하였을 때 시간에 따른 저온부의 온도 이력을 점선으로 표시하고 밀폐관 실험기에 대해서는 가장 큰 온도차를 보인 길이 100mm의 적판과 850mm 공명관을 사용하여 공명관 조입 10mm 위치에 적판을 설치하고 구동 주파수 193Hz로 120W의 동력을 가하였을 때 시간변화에 따른 저온부의 온도 이력을 실선으로 도시하여 비교한 것이다. 개방관 실험기인 경우 약 120초 후에 최저 온도 약 영하 8°C 를 나타내었으며 밀폐관 실험기인 경우 약 100초 후에 최저 온도 약 영하 9°C 를 나타내었다. 본 논문에서는 완벽한 냉동기 형태를 취하지 않고 열음향 현상과 하모닉 특성을 보고자 하였기 때문에 빙점 이하의 저온에서는 작동유체인 공기에 함유되어 있는 습기 때문에 적판 저온부의 착상으로 인한 온파의 사단과 구동 스피커의 보이스코일의 주유향 증가로 저온부의 온도가 상승하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 13은 그림 12의 밀폐관 실험기의 적판에 착상된 모습을 찍은 사진이다. 이후 실제 공기를 사용하는 열음향 냉동기의 작동 유체는 제습을 하거나 판형이 아닌 다른 형태의 열교환기를 사용하는 것이 바람직한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

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

- (1) 공명주파수 외 주파수 대는 정재파가 아닌 진행파가 되기 때문에 적판에 대한 열교환을 고정 위치에서 정확하게 할 수 없게 되어 온도차가 감소한다.
- (2) 개방관 열음향 실험기로 행한 1차 하모닉 실험에서 4가지 길이의 적판 중 100mm 적판에서 가장 큰 온도차를 보인다.
- (3) 스피커동력이 10W일 때 개방관형 냉동기 경우 500mm 공명관에서 밀폐관형 냉동기인 경우 850mm 공명관에서 가장 큰 온도차를 보인다.
- (4) 특정 주파수의 증폭을 위해서 구형 공명통을 사용하면 공진 주파수의 변화 없이 Q 값을 높일 수 있고 관의 공명 주파수에 근접하여 더 나은 1/4 파장 개방관 역할을 한다.
- (5) 공기를 작동유체로 사용할 때 적판의 저온부 착상은 관 내 음향에너지를 차단하기 때문에 제습을 하거나 빙점된 판형이 아닌 다른 형태의 열교환기의 채용이 바람직하다.

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) R.L Carter, private communication of atomics International Division of North American Aviation, Inc., 1962
- (4) Wheatly, T. and Cox, A., "Natural Engines", *Phys. Today*, Vol.38, No.8, 1985.
- (5) Hofler.T.J., "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance", Ph. D. dissertation at University of California, San Diego, 1986.
- (6) Steven L. Garrett, Thomas J. Hofler, "Thermoacoustic refrigerator", ASHRAE, December 1992, pp8-36, 1992.
- (7) 박종호, 우삼룡, "열음향 냉동 장치의 제작." 한국 물리학회지, Vol. 10, pp., 1997.
- (8) Swift G.W., "Thermoacoustic Engines and Refrigerators", *Physics Today*, pp.22~28., July 1995.
- (9) 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.
- (10) Swift.G.W.1988, Thermoacoustic Engines, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.84, No.4, pp.114 5~ 1180

지 자 소 개



송규조 (宋圭祚)

1968년 3월 1일생, 1990년 충남대 공대 기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 기계공학과 박사과정



이성노 (李盛魯)

1944년 6월 22일생, 1972년 전북대 공대 기계공학과 졸업, 1974년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1976년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사) 현재 충남대 공대 기계공학과 교수