

개방관과 밀폐관의 열음향 효과에 관한 하모닉 특성 연구(2)- 2차, 3차 하모닉

An Experimental Study on the Characteristics for Open-Tube and Closed-Tube Thermoacoustic Effects(2)- The 2nd, 3rd Harmonic

송규조*, 박종호**, 이성노**

Kyu Joe Song*, Jong Ho Park**, Sung Ro Lee**

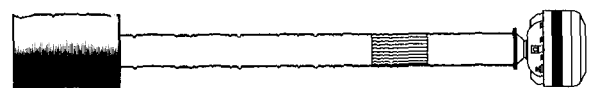
Abstract: In this study, the experimental open-tube and close-tube thermoacoustic apparatuses were built. In order to determine the optimum length of resonant tube and the optimum length of stack, the resonant characteristics of thermoacoustic apparatuses were investigated. The length of resonant tube varies from 400mm to 850 mm. The experimental frequency varies from 100Hz to 1000Hz. In case of the second and third harmonics, the maximum temperature difference of open-tube thermoacoustic apparatus is 53°C (resonator length: 400mm) and the maximum temperature difference of closed-tube thermoacoustic apparatus is 51°C (resonator length: 500mm). In the open-tube thermoacoustic apparatus, the peak efficiency point is about 2%, 55%, 69% in the resonant tube and in the closed-tube thermoacoustic apparatus, the peak efficiency point is about 2%, 41%, 50% in the resonant tube.

Key Words: Thermoacoustic, Harmonic, Resonator, Standing wave

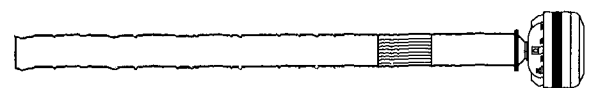
1. 서 론

각종 냉동기에 사용되고 있는 프레온가스(CFC, Chloro Fluoro Carbon) 등의 냉매는 환경 오염원으로 사회문제가 되고 있어 2016년에 사용 금지 될 전망이다. 이에 대체 물질과 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 음향발생 장치가 기존 냉동기의 압축기 역할을 대신하고 있으며 CFC를 냉매로 사용하는 대신에 헬륨, 아르곤 등 환경에 무해한 기체를 사용하며, 구조가 비교적 간단하여 유지 보수가 쉽고 기계적 신뢰도가 높은 것이 특징이다. 열음향 기관은 1777년 Higgins[1]가 커다란 관에서 수소불꽃 실험을 통해 음향진동 현상을 발견하면서 시작되어 Sondhauss[2]등에 의해 음향진동

에 대한 연구가 진행되었으며, 극저온 냉동장치에서 가스가 주입된 관이 상온에서 극저온에 접근할 때 매우 큰 진폭을 갖는 Taconis진동 발생에 대하여 1954년 Clement[3], 1980년 Yazaki[4]등이 계속해서 연구를 하여 왔다. Feldman[5]은 Sondhauss 진동기에 적판(stack)을 설치하여 열음향 현상을 실험·분석하였으며, 600W의 열에서 27W의 음향동력을 얻었다. 1966년 Gifford[6]는 관속의 가스에서 매우 낮은 주파수와 높은 진폭을 가진 압력진동에 의한 냉동효과를 제시하였으며, 1969년 Rott[7]에 의해 열음향 기관과 냉동기에 대한 기초적인 연구가 수행되었고 1983년 Wheatley[8]에 의해 열음향 냉동기의 실용화 연구가 시작되었다. 1988년 Hoffer[9]는 증음 스피커를 구동기로 하고 공명관 내에 헬륨기체를 10기압으로 충전시켜 플라스틱 적판과 구리 열 교환기판 이용, 500Hz로 공진 시킴으로서 영하 70°C의 저온을 얻어 실용화 가능성을 보였다. 최근 선진국에서는 열음향 기관과 열음향 냉동기를 결합한 자동차용 공기조화장치, 우주선용 냉각기(STAR, 작동주파수 400Hz), 레이더 전파 발생장치 냉각용, 소형 냉장고(TALSR, 작동주파수 320Hz)가 실용화되었으며, 대용량, 대규모의 열음향 냉동기의 실용화를 위하여 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 박종호[10]가 열음향에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있는 중이다. 본 논문에서는 열음향 냉동기의 음향 특성을 파악하기 위하여 개방관과 밀폐관 열음향 실험기를 제작하였고 첫 번째 하모닉 내 실험에 이어 두 번째 하모닉 대에서 실험기의 성능을 좌우하는 최적 구동 주파수와 적판의 길이 그리고 적판의 중요 위치에 대한 냉동효과를 찾는 실험을 수행하였다.



(a) Open-tube-type Thermoacoustic Refrigerator



(b) Closed-tube-type Thermoacoustic Refrigerator

그림 1. 개방관 열음향 실험기와 밀폐관 열음향 실험기
Fig. 1. Open-tube thermoacoustic apparatus refrigerator and closed-tube thermoacoustic apparatus

* 학생회원 : 충남대 대학원 기계공학과 박사과정

** 비 회 원 : 충남대 공대 기계공학과 교수

원고접수 : 2002년 04월 01일

심사완료 : 2002년 05월 20일

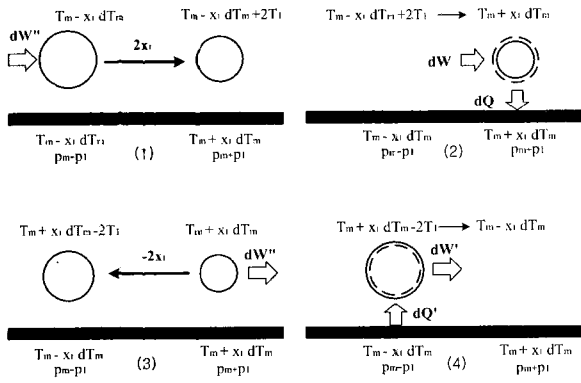


그림 2. 열음향 냉동기 적관 상의 기체입자들
 Fig. 2. Typical fluid parcels in a thermoacoustic refrigerator's stack

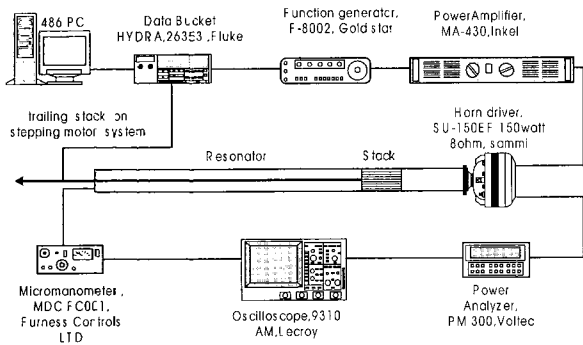


그림 4. 실험 장비도(밀폐관 열음향 실험기)
 Fig. 4 Schematic diagram of the experimental arrangement.(close-tube thermoacoustic apparatus)

두 번째 하모닉에서는 공명관 내에 최대 온도차점 부근마다 적관을 설치하면 냉동기의 효율을 상승시키는 방안이 될 수 있기 때문에 최대 온도차점의 위치는 중요하다.

2. 열음향 기본원리

그림 2의 열흐름 개략도를 보면 적관을 따라서 기체입자가 진동할 때 온도변화를 동반하게 되는데 온도 변화의 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창이며 부원인은 적관으로의 열전달 결과이다. 기체입자의 진동 중심을 $x=0$, 진동거리를 x_1 , 평균온도를 T_m , 온도구배를 dT_m , 온도변화를 T_1 , 평균압력을 P_m , 압력변화를 P_1 이라고 하면 진동하는 기체입자에 근접한 저온측 적관의 온도는 $T_m - x_1 dT_m$ 이고 고온측 적관의 온도는 $T_m + x_1 dT_m$ 이다. 우선 첫 번째 단계로 기체 입자가 $2x_1$ 만큼 움직여 단열 압축된다. 그러면 온도는 $T_m - x_1 dT_m$ 에서 $T_m - x_1 dT_m + 2T_1$ 으로 상승하게 된다. 두 번째 단계로 $T_1 > x_1 dT_m$ 이라고 하면 등압조건에서 기체입자의 열은 판을 향하여 전달되어 기체온도는 $T_m + x_1 dT_m$ 가 된다. 세 번째 단계로 기체입자는 원위치로 돌아오면서 단열 팽창에 의해 온도는 $T_m + x_1 dT_m - 2T_1$ 로 낮아지게 된다.

네 번째 단계로 판의 온도는 기체입자의 온도보다 높으므로 기체는 열을 흡수하여 $T_m - x_1 dT_m$ 의 원래 온도가 된다. 이 사이클은 소리의 진동으로 발생하는 일에 의해 열 dQ 가 펌핑이 된다. 개괄하면 전체 적관에 걸친 음파의 종진동을 매개로 기체입자들도 같이 진동하면서 열이 인접한 기체 입자로 계속 전달이 되기 때문에 정상상태에 도달할 때까지 계속 온도가 떨어진다. 하모닉에 대해서 살펴보면, 관에 정재파를 가진시키면 개방관은 관끝에서 압력 최소점이 나타난다. 관의 길이는 $\lambda/4$ 의 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 3의 상단부는 3차 하모닉인 3/4파장을 보여주고 있다. 정재파가 인가된 밀폐관은 관끝에서 압력 최대점이 나타난다. 관의 길이는 $\lambda/2$ 의 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 3의 하단부는 2차 하모닉인 2/2파장을 보여주고 있다.

3. 실험장치 및 장치제작

두 번째 하모닉에서 열음향 냉동효과를 실험하기 위하여 그림 4에 보인 바와 같이 개방관 실험기와 밀폐관 실험기를 제작하고 측정장치를 설치하였다. 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 개방관 실험기의 경우 음장이 형성되는 아크릴 공명관과 개방관 조건을 만들어 주는 PVC 공명통, 두 개의 부분으로 구성되어지고 밀폐관 실험기인 경우에는 아크릴 공명관 하나만으로 구성되어졌다. 아크릴 공명관인 경우 적관의 위치를 쉽게 파악할 수 있고 센서의 상태 확인 및 온도 강하에 따른 현상을 파악하기 쉽게

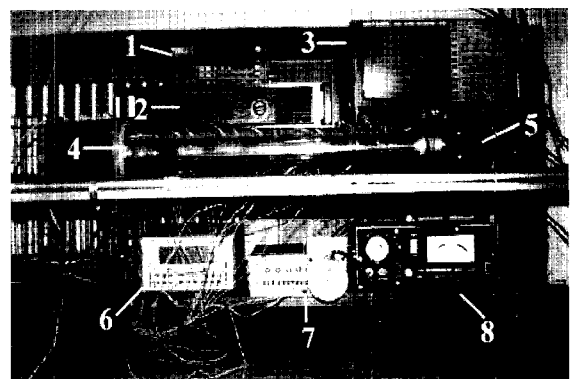


사진 1. 실험 장비(개방관 열음향 실험기)
 Photo. 1. Photograph of experimental apparatus
 1. data Aquisition System. 2. amplifier
 3. oscilloscope 4. resonator
 5. horn Driver 6. power Analyzer
 7. function Generator 8. micro Mancometer

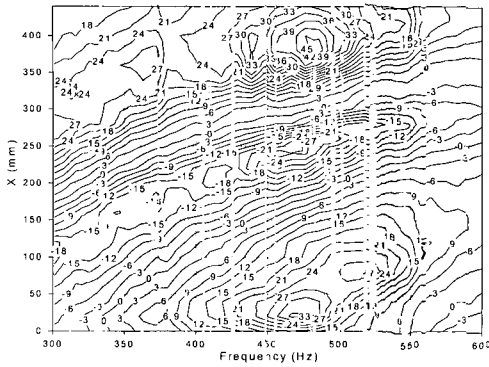


그림 5. 개방관 실험기에서 두번째 조화파의 온도차분포
Fig. 5. Contour of temperature difference at the 3rd harmonic. (3/4wave)

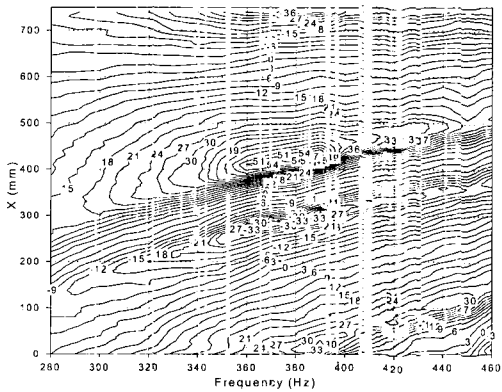


그림 6. 밀폐관 실험기에서 두번째 조화파의 온도차분포
Fig. 6. Contour of temperature difference at the 2nd harmonic. (2/2wave)

열전도가 낮은, 내경 40mm, 외경 50mm 크기의 투명 아크릴 관으로 제작하였다. PVC 공명통인 경우 내경 99mm 길이 140mm의 폴리 염화비닐 관으로 제작하였고, 말단부는 두께 15mm인 아크릴 판으로 되어 있으며 중심에 적판 이동용 스테인레스 파이프 통과 구멍을 내었다. 밀폐관 실험기인 경우 말단부에 두께 10mm의 아크릴 판으로 아크릴 공명관을 밀폐하였으며 개방관 실험기와 같이 적판과 연동할 수 있는 스테인레스 파이프의 통과 구멍을 내었다. 아크릴 공명관 내의 온도 변화는 스텝모터를 사용하여 적판의 위치 및 주파수를 제어하여 관찰하였다. 적판은 0.06mm 두께의 캡톤 필름에 직경 0.37mm 낙시줄을 3~6mm 간격으로 집착한 뒤 이것을 말아서 직경이 40mm가 되도록 하여 길이 100mm, 80mm, 60mm, 40mm의 적판 4개를 제작하여 사용하였다. 온도측정은 저·고온부 적판면에 직접 K형 열전대를 설치한 뒤 데이터 획득 장치(Fluke HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 3분의 간격을 두면서 데이터를 수집하였다. 모든 실험에서 스피커 동력을 비교적 적은 동력인 10W (speaker capacity 150W)로 설정했기 때문에 공명관 내에서 정상 상태 도달 온도는 약 1분이 걸리지만 적판의 위치를 변동 할 때 스텝 모터의 작동시간(10초)이나 데이터

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

4. 실험방법 및 결과 고찰

준비된 공명관(850mm, 700mm, 600mm, 500mm, 400mm)을 사용하여 개방관 실험기와 밀폐관 실험기로 전환시켜 사용하였다. 최적 구동주파수는 각 공명관 초입에 적판을 설치한 다음, 주파수를 상황에 따라 100Hz에서 1000Hz까지 약 10Hz 간격으로 변화 (sweeping)시켜 얻은 데이터를 바탕으로 중요구간을 다시 2Hz 간격으로 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 쪽 공명관 초입을 y축을 0으로 기준 하여 공명관 말단부까지 10mm간격으로 적판의 위치를 이동시키면서 적판 양단의 온도를 측정하였다. 밀폐된 관을 따라 정현파를 증폭하여 스피커를 진동시키면 음파의 발생에 따라 압력이 밀한 부분과 소한 부분으로 배와 마디를 형성하게 된다. 개방관과 밀폐관에서 두 번째 하모닉은 그림 3과 같이 나타나며 기본적으로 정재파를 생성한다. 그림 5는 x축으로는 300Hz에서 600Hz까지 10Hz 간격으로, y축으로는 540mm 공명관을 따라 적판을 1cm씩 이동시키면서 측정하여 구성한 등온도표로 100mm 적판을 사용하였다. 정현파의 3/4 파장인 3차 하모닉은 약 480Hz를 인가 시, y축 30mm와 y축 380mm에서 각각 30℃와 45℃의 온도차를 나타내고 있으며 최고치를 따라서 y축으로 다음 최고치까지 한번의 고,저역전 현상(y축 250mm)이 나타나고 있다. 최고 온도점에 해당하는 주파수 주위로는 점차 온도차가 감소하고 있는 것을 볼 수 있는데 그것은 정재파가 아닌 진행파가 되면서 적판에 대한 열교환이 고정 위치에서 정확하게 할 수 없게 되기 때문이다.

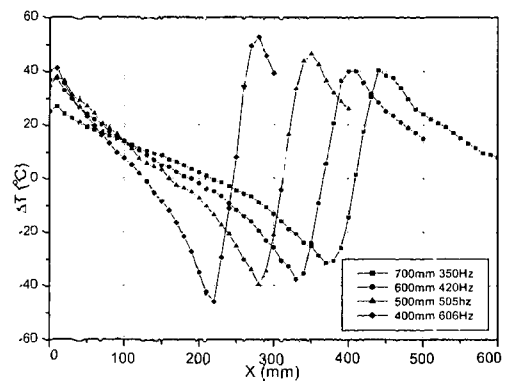


그림 7. 공명관길이에 따른 온도차선도(3/4파장, 3차 하모닉, 개방관 실험기)
Fig. 7. ΔT profiles with resonator length according to X axis. ($3\lambda/4$, 3rd harmonic, open tube)

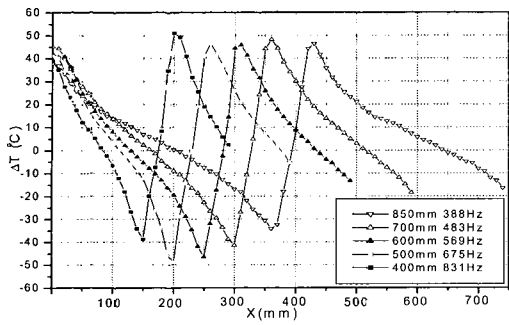


그림 8. 공명관길이에 따른 온도차선도(2/2과장, 2차 조화파, 밀폐관 실험기)
 Fig. 8. ΔT profiles with resonator length according to X axis. (2/2, 2nd Harmonic, Closed Tube)

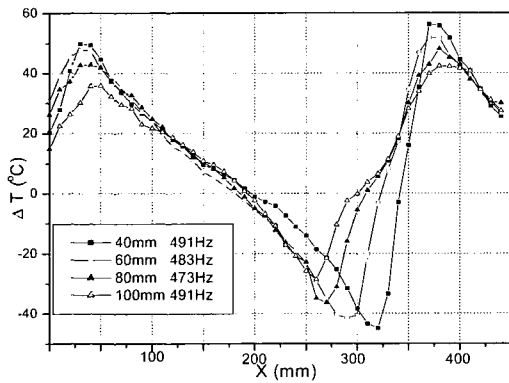


그림 9. 적판길이에 따른 온도차선도(3/4과장, 3차 조화파, 개방관 실험기)
 Fig. 9. ΔT profiles with stack length according to X direction. (3λ/4, 3rd Harmonic, Open Tube)

그림 6는 x축으로는 280Hz에서 460Hz까지 10Hz 간격으로 측정된 결과이며 y축으로는 850mm 공명관을 따라 1cm 간격으로 측정된 등온도표로서 정현파의 2/2과장인 2차 하모닉에서 3℃간격의 분포를 나타내고 있다. 약 380Hz와 공명관 내 약 20mm 위치에서 약 33℃의 온도차를, 420mm 부근에서 54℃의 온도차를 보이고 있고 y축 300mm 부근에서 -33℃ 온도차를 그리고 y축 740mm에서 -36℃ 온도차를 기록하고 있다. 여기서 음의 부호가 붙은 것은 적판의 고온부와 저온부의 역할이 서로 역전된 것을 의미하고 있다. 2/2과장 공명관 내에서 기체입자의 압력은 두 개의 최소압력 지점을 생성하기 때문에 두 번의 적판 위치 역전이 이루어진다.

그림 7은 개방관을 사용하고 3차 하모닉(3/4과장) 영역에서 가장 큰 온도차를 보이는 각 공명관들의 x축 방향 온도 도표이다. 실험 결과 두 번째 하모닉에서는 40mm 적판이 가장 큰 온도차를 보이는 것으로 나타났다 때문에 본 실험에 사용하였다. 400mm 공명관에서 최초 역전 온도점은 x축 130mm에서 나타나고 x축 220mm에서 역전 온도점이 나타나서 700mm 공명관까지 공명관의 길이에 비례하여 역전 온도점이 분포한다. 3차 하모닉에서는 400mm 공명관의 x축 280mm 위치에서 최대 온도차인 52.7℃를 보이며 공명관의 길이가 증대 될수록 온도차는 감소하는 경향을 보인

다. 3차 하모닉은 두 개의 압력배를 가지는데 스피커와 인접한 압력배 보다는 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. 그리고 관끝으로 갈수록, 발생한 열의 축적이 또 하나의 원인으로 작용한다. 그림 3에서 보인 바와 같이 3차 하모닉은 개방관형 실험기의 1/4과장 단위 압력 3개로 구성되어 있기 때문에 그림 7의 그래프에서도 3개의 변곡 온도점을 볼 수 있다.

그림 8은 밀폐관을 사용하고 2차 하모닉(2/2과장) 영역에서 가장 큰 온도차를 보이는 각 공명관들의 x축 방향 온도 도표이다. 이때 사용된 적판 역시 40mm를 사용하였다. 2차하모닉 인 밀폐관에서 압력형상은 두 개의 마디를 가지며 관중간, 스피커쪽, 관말단의 3곳에서 최대 압력을 가진다. 850mm관을 예를 들어보면, 압력마디는 공명관 내 압력이 최소인 지점을 뜻하며 압력배는 압력이 최대인 지점을 뜻하고 있는데 공히 온도차는 발생하지 않는 지점들로서 1차압력 마디는 공명관의 x축 200mm 부근에서 생성되고 2차압력 마디는 x축 650mm 부근에서 발생하는 것을 알 수 있으며 1차 압력배는 x축 20mm 부근에서 그리고 2차 압력배는 x축 400mm 부근에서 발생하며 3차 압력배는 x축 740mm 부근에서 발생하는 것을 실험으로 알 수 있다. 이 실험에서도 개방관의 경우에서와 같이 400mm 공명관에서 최대의 온도차인 51℃를 보이고 있고 공명관의 길이에 반비례하여 온도차가 감소하고 있다.

표 1. 공명관에서의 최대온도차와 최소온도차(3/4과장)
 Table 1. Resonant tube vs. temperature peak & zero point (3/4 wave)

1/4wave	1st peak	1st zero	2nd peak	2nd zero	3rd peak
400mm	10mm 0.025	125mm 0.31	220mm 0.55	246mm 0.62	280mm 0.7
500mm	10mm 0.02	160mm 0.32	280mm 0.56	312mm 0.62	350mm 0.7
600mm	10mm 0.017	190mm 0.32	330mm 0.55	366mm 0.61	410mm 0.68
700mm	10mm 0.01	220mm 0.31	370mm 0.53	409mm 0.58	450mm 0.64

표 2. 공명관에서의 최대온도차와 최소온도차(2/2과장)
 Table 2. Resonant tube vs. temperature peak & zero point (2/2 wave)

1/2 wave	1st zero	2nd peak	2nd zero	3rd peak	3rd zero
400mm	840mm 0.21	150mm 0.375	175mm 0.44	200mm 0.5	300mm 0.75
500mm	110mm 0.22	200mm 0.4	230mm 0.46	260mm 0.52	375mm 0.75
600mm	130mm 0.22	250mm 0.417	282mm 0.47	300mm 0.5	433mm 0.72
700mm	162mm 0.23	300mm 0.43	327mm 0.47	360mm 0.51	514mm 0.73
850mm	200mm 0.24	360mm 0.42	393mm 0.46	430mm 0.51	645mm 0.76

그림 9는 개방관을 사용하였으며 3차 하모닉(3/4파장) 영역에서 가장 큰 온도차를 보이는 주파수를 사용하여 실험한 적판들의 온도 도표이다. 40mm 적판은 50℃, 60mm는 48℃, 80mm는 43℃ 그리고 100mm는 36℃로 적판의 길이가 짧을수록 온도차가 높게 나타나고 있다. 전체 공명관 길이가 540mm이므로 단위 1/4파장의 길이는 180mm이다. 단위 파장 길이 대 적판의 길이 비는 40mm 적판의 경우 4.5, 100mm 적판의 경우 1.8로 비가 작을수록 적은 온도차를 보인다. 1차 하모닉 실험에서는 100mm 적판에서 양호한 결과를 얻었는데 단위 파장 대 적판의 길이 비는 5.4였고 40mm 적판이었을 경우에는 비는 13.5였다. 종합해 보면 단위 파장 대 적판의 길이 비는 너무 작거나 클 때 적합한 온도차를 얻을 수 없는 것을 알 수 있고 비는 4~5정도가 적합하다.

표 1은 각각의 개방관형 공명관 내에 발생한 최고 온도점의 위치와 온도차가 0이 되는 위치들을 표시하고 있다. 첫 번째 온도차가 0이 되는 지점(1st zero)은 공명관 내 최소압력 변화가 발생하는 지역으로 기체 입자가 팽창과 압축을 할 수 없기 때문에 온도차가 발생하지 않는다. 또한 두 번째 온도차가 0이 되는 지점(2nd zero)은 공명관 내 최고 압력 지점으로 서로 90도의 위상차를 지닌 기체입자의 압력과 속도 중 속도가 0이 되는 지점이기 때문에 열을 수송할 수 없어 온도차는 0이 된다. 기체의 압력과 진동 변화가 조화된 위치에서 최고 온도차가 발생하는데 압력 배에서 마디 쪽으로 약 17% 편향된 위치에서 최고 온도차가 발생하고 있다. 각 관에서 단위가 붙어 있는 것이 공명관 길이에 대한 절대위치이고 붙어 있지 않은 것이 공명관 길이에 대해 무차원화 시킨 위치이다. 최소 압력지점(1st Zero)은 각 공명관에 대해 31.5% 지점이고 최대 압력지점(2nd Zero)은 61% 지점인 것을 알 수 있다.

표 2는 각각의 밀폐관형 공명관 내 발생하는 최고 온도점의 위치와 온도차가 0이 되는 위치들을 표시하고 있다. 공명관 내 첫 번째 최소압력점(1st Zero)은 약 22% 지점이고 두 번째 최소압력점(3rd Zero)은 약 75% 지점이다. 최대압력점(2nd Zero)은 관의 처음과 끝 부근 그리고 46% 지점에서는 y축으로 1cm 당 20℃의 온도차에 달하는 급격한 온도구배가 형성되는데 고온부와 저온부의 역할이 급속히 바뀌는 영역이다. 실험으로 나타난 최고 온도차 위치들에 각각 적판을 설치하여 운전하면 하나의 관으로 수 개의 저온부를 발생시킬 수 있다.

5. 결 론

두 번째 하모닉에 대해서 밀폐관과 개방관 열음향 실험기의 공명관 길이변화에 따른 최적주파수, 그리고 적판의 길이에 따른 온도차와 위치 변화에 대한 최적조건을 찾기 위한 실험연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열음향 실험기의 두 번째 하모닉 대에서는 40mm 적판이 가장 큰 온도차를 보인다.
- (2) 첫 번째 하모닉과 두 번째 하모닉에서 적판의 길이를 실험한 결과 단위 파장 대 적판의 길이 비는 4~5정도가 적합하다.
- (3) 두 번째 하모닉 대에서 개방관 열음향 실험기 경우 400mm 공명관, 606Hz에서 가장 큰 온도차인 53℃를 보였으며 밀폐관 열음향 실험기 경우 400mm 공명관, 831Hz에서 가장 큰 온도차인 51℃를 보였다.
- (4) 개방관 열음향 실험기에서 최소 효율점은 각 공명관에 대해 약 31%, 61% 부근이고 최대 효율점은 약 2%, 55%, 69% 부근이다.

- (5) 밀폐관 열음향 실험기에서 공명관 최소 효율점은 각 공명관에 대해 약 22%, 46%, 75% 부근이고 최대 효율점은 약 2%, 41%, 50% 부근이다.

참 고 문 헌

- (1) B.Higgins, Nicholson's J.1,130,1802
- (2) C.Sondhauss, "Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasrohren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite," Ann. Phys (Leipzig) 79, 1, 1850
- (3) J.R.Clement, and J.Y.Gaffne "Thermal Oscillations in Low Temperature Apparatus" Adv. Cryog. Eng., Vol. 1, pp.302,1954.
- (4) T.Yazaki, A.Tominaga, and Y.Narahara, "Experiments on Thermally Driven Acoustic Oscillations of Gaseous Helium," J. Low Temp. Phys., Vol. 41, pp. 45, 1980.
- (5) K. T. Feltman, "Review of The Literature on Sondhauss Thermoacoustic Phenomena" J. Sound Vib., Vol. 7, pp. 71, 1968.
- (6) W. E. Gifford and R. C.Longthworth, "Surface Heat Pumping," Adv. Cryog. Eng., Vol. 11, pp. 171, 1966.
- (7) N.Rott, "Thermoacoustic," Z. Angew. Math. Phys., Vol. 20, pp.135~175, 1969.
- (8) J.Wheatley, T.Hofler, G. W.Swift and A.Migliori, "An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74, pp. 153~170, 1983.
- (9) T. J.Hofler, "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance," Ph.D. dissertation at University of California, San Diego, 1986.
- (10) 박종호, 우삼남, "열음향 냉동장치의 제작," 용물리학회지, Vol. 10, pp. 181~185., 1997.

저 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



박종호 (朴鐘鎬)

1951년 3월 6일생, 1973년 전북대 공대 기계공학과 졸업, 1975년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1985년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사) 현재 충남대 공대 기계공학과 교수



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