

헬륨을 냉매로 사용한 1/4파장 열음향 냉동기의 성능 평가

The Performance Investigation of 1/4 Wavelength Thermoacoustic Refrigerator with Helium Refrigerant

송 규 조*, 박 종 호**, 이 성 노**

Kyu Joe Song, Jong Ho Park, Sung Ro Lee

Abstract : In this study, a thermoacoustic refrigerator, using a resonant standing acoustic wave, has been built. The refrigerant is helium gas. The description of thermoacoustic refrigerator was presented. The temperature ratio (cold part temperature over hot part temperature) and the COP (Coefficient of Performance) that normalized by carnot's COP are plotted versus the thermal load applied to the cold end, for various speaker power.

Key Words : Thermoacoustic, Stack, COP, Frequency

1. 서 론

각종 냉동기에 사용되고 있는 프레온가스(CFC, Chloro Fluoro Carbon) 냉매는 오존층 파괴의 주범으로 환경보호를 위해 사용이 규제 받고 있으며 2016년에는 생산이 중단 될 예정이다. 그렇기 때문에 대체물질과 함께 새로운 냉동기술들이 개발되고 있다. 열음향 냉동은 비교적 최근에 새로운 냉각 기술로 연구되어지고 있으며 증기 압축식 냉동기에 비해 큰 동력을 필요로 하지 않는 저온 냉동기술 중 하나로 스피커가 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. 간단한 열음향 현상의 예는 18세기 유리 세공자들은 뜨거운 유리공에 차가운 유리관을 접합시킬 때 유리관의 개구부에서 음향이 발생하는 것을 목격한 것으로 Sondhauss[1]는 관 크기와 음향 세기와의 관계를 실험하였다. Kirchoff[2]는 1868년에 첫 번째로 열음향 효과를 이론적으로 설명하려고 시도하였으며 그 내용은 기체 중 음파와 등은 덕트 벽 사이의 열확산에 기인한 덕트 내 음파의 감쇠에 대한 것이었다. 1896년에서야 Rayleigh[3]가 정성적인 방법으로 열음향 현상을 정확하게 설명하였다. 유사한 현상인 Taconis 진동은 기체를 채운 관에 한쪽 끝은 상온상태로 유지시키고 한쪽 끝에는 액체 헬륨 (4 K)에 접촉시키면 극도로 높은 진폭이 유도되는 진동이 유발하게 된다. Taconis[4]도 정성적인 방법으로 그 현상을 설명하였다. 첫 번째 음향학적 열펌프의 예는 맥

동관 냉동기인데 Gifford와 Longsworth[5]는 밀폐관 끝에 저주파의 고진폭 진동을 인가시켜 $T_c/T_h = 1/2$ 의 온도비를 발생시키는데 성공하였다. 동시대에 Merkli와 Thomann[6]은 정온을 유지시킨 관벽에 정재파를 발생시켰는데 속도배 근처 지역으로부터 인접 압력배 지역으로 열이 이동하는 것을 확인하였다. 열음향 냉동기의 성능을 대폭 향상시킨 사람은 Carter[7]로 1962년에 관내부에 평행 판의 집적체인 적판을 설치하여 Sondhauss 효과를 배가 시켰다. 이후 1969년에서야 비로서 Rott[8]가 열음향 기관과 냉동기에 성공적으로 적용될 수 있는 열구동 음향발생과 음향 열전달에 대한 이론들을 완성하게 되었다. 1983년 Wheatley[9]에 의해 열음향 냉동기의 실용화 연구가 시작되어 1988년 Hofler[10]는 중음 스피커를 구동기로 하고 공명기에 헬륨을 10 기압으로 채운 다음 플라스틱 적판과 구리 열교환기를 이용하여 500 Hz로 공진 시킨 뒤 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 행되고 있다.

국내에서도 박종호[11]등은 Hofler 냉동기를 모델로 하여 대기압의 공명기에 중음 스피커를 600 Hz로 구동시켜 냉동효과를 관찰하였으며, 이에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있다. 본 논문에서는 1/4 파장 열음향 냉동기를 제작하고 길이가 다른 두 개의 공명관을 사용하여 헬륨을 냉매로 사용한 성적계수, 최저온도 등을 실험하였으며 관의 길이가 열음향 냉동기 성능에 끼치는 영향을 실험으로 비교하였다. 또한 스피커 동력 변화에 따른 주파수 변화와 공

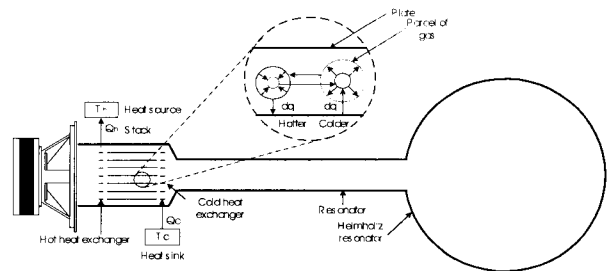


그림 1. 1/4 파장 열음향 냉동기 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of 1/4 wavelength thermoacoustic refrigerator.

* 학생회원 : 충남대 대학원 기계공학과 박사과정

** 비 회 원 : 충남대 공대 기계공학과 교수

원고접수 : 2002년 04월 01일

심사완료 : 2003년 01월 14일

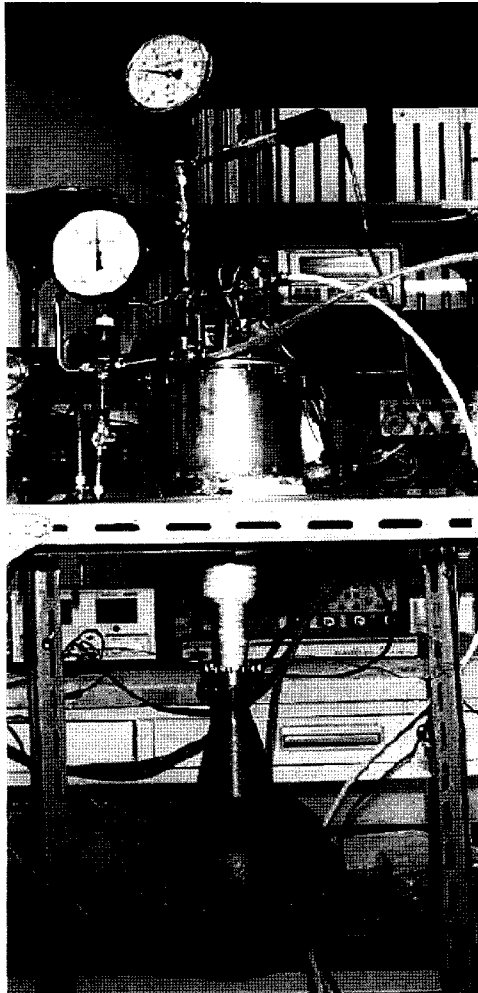


사진 1. 1/4 파장 열음향 냉동기 사진
Photo. 1. Photograph of 1/4 wavelength thermoacoustic refrigerator

연구가 진명관 내 평균 압력 변화에 따른 주파수 변화 등을 관찰하였다.

2. 열음향 기본원리

그림 1은 열음향 냉동기의 개략적인 작동원리를 보여주고 있다. 헬륨으로 충전된 공명기를 통하여 1/4 파장이 형성된 스피커 음파는 적판을 따라 기체입자가 열펌핑 작용을 하게 만드는 중요한 매개 역할을 하게 된다. 1/4 파장 공명은 각 파장 공명 조건에 있어서 필수는 아니지만 스피커의 기계적인 면으로 볼 때 최소 동력으로 높은 진폭을 얻을 수 있는 방법이 된다. 1/4 파장 냉동기 구동 시 압력배는 스피커 부근 관 초입에 위치하고 압력 절점은 구공명기 부근 관 말단에 위치한다. 적판은 일반적으로 수 배의 열침투 깊이를 가진 단판들로 구성되어 겹고 진폭의 크기에 따라 유사한 온도 분포를 가진다. 열침투 깊이는 기체가 한 사이클 동안 열을 확산시킬 수 있는 거리를 말하며 열침투 깊이로 열교환을 하는 기체층을 열경계층이라고 부르는데 유한한 시간 동안 발생한 열전도와 열적 저항을 포함하고 있고 그 결과로 P_1 (압력변동)과 T_1 (온도변동)사이의 시간 위상 지연을 보인다. 적판을 따

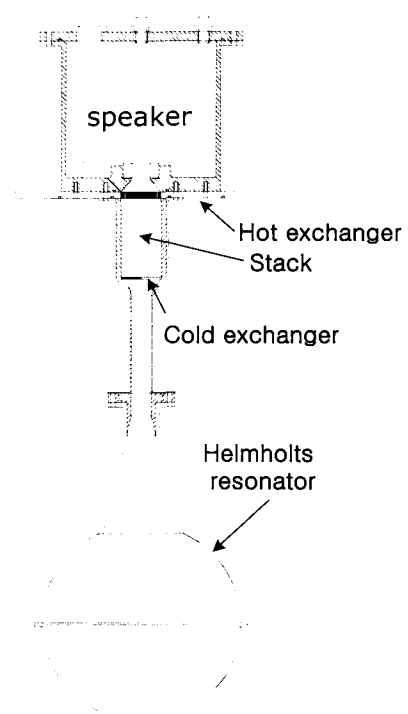


그림 2. 1/4 파장 열음향 냉동기 설계도
Fig. 2. Design of a 1/4 wavelength thermoacoustic refrigerator.

라 기체가 진동할 때 온도변화를 동반하게 되는데 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창이며 부원인은 적판으로의 열전달 결과이다. 그림 1의 확대부에서 왼쪽의 기체입자는 정재파로 인한 단열 압축에 의해 국소 판 온도 이상으로 상승하기 때문에 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.

3. 실험장치

사진 1은 진공 용기를 배제시킨 실험용 냉동기의 전경을 그림 2는 냉동기의 설계도를 보이고 있다. 제작한 열음향 냉동기에 헬륨을 사용한 냉동 효과를 실험하기 위하여 그림 3에 보인 바와 같이 측정 장치들을 설치하였다. 실험용 냉동기의 구성 부품 중 내경 150 mm 깊이 160 mm의 원통인 스피커 하우징은 황동 재질로서 내측에 스피커를 고정시키면서 기체의 압력을 유지시키는 역할을 하고 있다. 스피커 하우징 덮개는 황동 재질로 스피커 동력선과 열전대들을 외부로 인출시킬 수 있는 feedthrough를 설치하였고 냉매를 주입시키기 위한 피팅과 밸브 등을 설치하였으며 냉동기 내 평균압력을 인지하기 위하여 압력변환기(Keller, PA-21SR/80444, 5-10)를 설치하였다. 음향 동력원은 고성능 확성기에 사용되는 Horn driver(SU-150EF, 150 watt)를 사용하였으며 냉동기에 공급한 구동 음파는 함수발생기(Gold

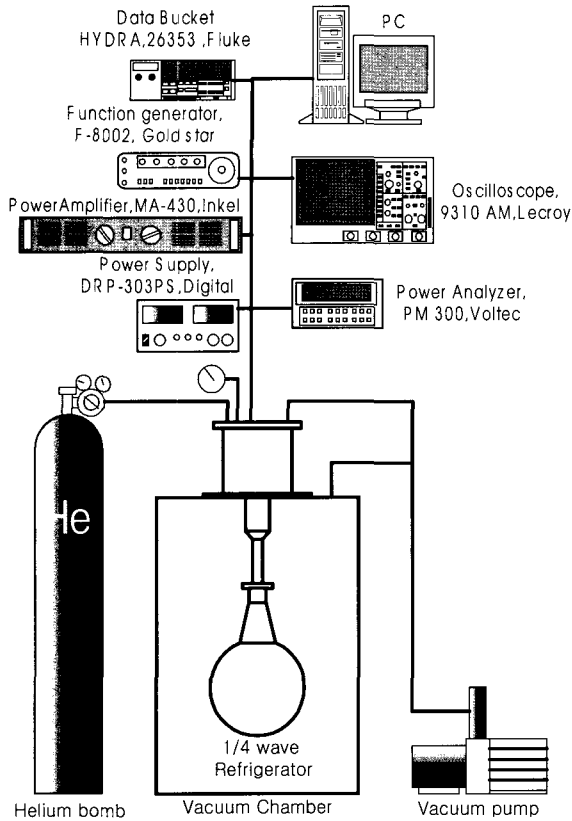


그림 3. 실험 장치 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental arrangement.

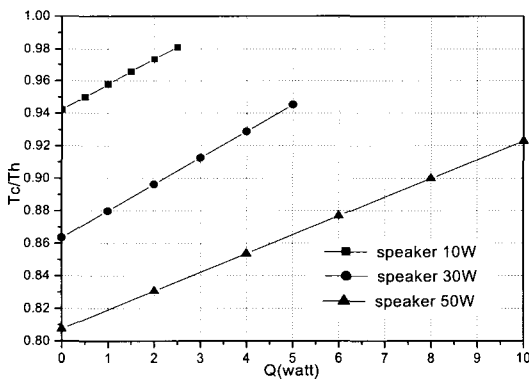


그림 4. 온도비 대 냉동부하 (337 mm 공명기)
Fig. 4. Temperature ratio, versus the electric heater power (337 mm resonator)

Star, F-8002)를 사용하여 정현파 신호를 발생시킨 뒤 증폭기(Inkel, MA430)를 통하여 스피커를 가진 시켰다. 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec, PM300)로 측정하였으며 디지털 오실로스코프(Lecroy, 9310AM)에 연결하여 주파수를 관찰하였다. speaker housing에 인접하여 고온 열교환기를 설치하였으며 직경 300 mm, 두께 5 mm의 구리원판을 사용하였다. 열교환기 중앙에는 40 mm 직경의 원안에 지름 1.5 mm의 구멍을 1.5 mm의 간격으로 방전 가공하여 공명기 쪽으로 음파를

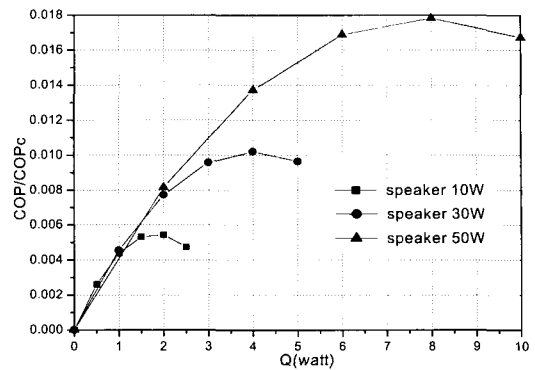


그림 5. 성적계수 대 냉동부하 (337 mm 공명기)
Fig. 5. Coefficient of performance normalized by Carnot's COP, versus the electric heater power (337 mm resonator)

보낼 수 있게 하였고 적판 고온부에서 발생한 열을 방출 할 수 있게 하였다. 발생한 음파를 매개로 공명관 내 기체입자들과 열교환을 하면서 열을 펌핑시키는 부품인 적판은 0.075 mm 두께의 플라스틱 재질인 Mylar 필름에 직경 0.37 mm 남시 줄을 3~6 mm 간격으로 접촉한 뒤 이것을 말아서 직경 40 mm, 길이 80 mm가 되도록 제작하여 사용하였다. 저온 열교환기는 펌핑 된 저온을 유지시키는 열저장소의 기능을 하고 있으며 직경 40 mm, 두께 2.5 mm의 구리 재질이고 고온 열교환기와 같은 제원을 가진다. COP를 산출 할 때 냉동부하를 걸어주는 히터부는 저온열교환기를 감싸면서 적판이 들어있는 대구경관에서 소구경관으로 가는 축소부(reducer) 역할을 겸하며 재질은 황동으로, 외측에는 망가닌 열선(Lake Shore, MW-36)을 길이 1067 mm로 감았다. 1 차 단열은 길이 77mm, 두께 5mm의 아크릴 수지 실린더를 사용하였으며 적판에서 펌핑된 열을 외부로 유출되지 못하도록 금속공명기 내부와 적판 사이에 삽입시켰다. 2 차 단열은 단열테이프를 사용하여 대구경관, 축소부, 소구경관 부근까지 테이핑을 하였다. 3 차 단열은 진공용기를 사용하였으며 외부로 유입되는 복사열을 방지 할 목적으로 내경 380 mm, 길이 740 mm의 강철제 용기를 사용하여 실험 중 진공을 유지시켰다. 공명관 본체는 직경이 다른 실린더로 구성되어 있으며 대구경관 내경은 50mm, 소구경관 내경은 20mm이고 두께는 공히 2mm이다. 대구경관과 소구경관은 45도 경사의 스테인레스 스틸(SUS304) 테이퍼 관을 제작하여 MIG용접으로 연결하였고 다른 부품과의 연결은 플랜지를 사용하였다. 이 공명관 부품은 2개를 제작하였다. 하나는 길이가 196 mm이며 다른 하나의 길이는 146 mm이다. 헬륨홀츠 공명기는 음파를 1/4 파장으로 만들어 주는 개방관 역할을 해주며 동시에 압력 저장 용기의 구실도 하고 있다. 여기서는 테이퍼부와 헬륨홀츠 공명기가 일체로 구성되어 있으며 테이퍼부의 소단부 내경은 29 mm, 대단부 내경은 82 mm, 길이는 100 mm이고 두께는 4 mm이며, 부착된 플랜지로 공명관과 연결하였다. 헬륨홀츠 공명구의 내경은 150 mm, 재질은 강이며 NC 선반으로 제작하였다. 적판 저·고온부에서의 온도측정은 측정부에 K형 열전쌍을 설치한 뒤 Data logger(Fluke, HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 데이터를 수집하였다.

4. 실험방법 및 결과 고찰

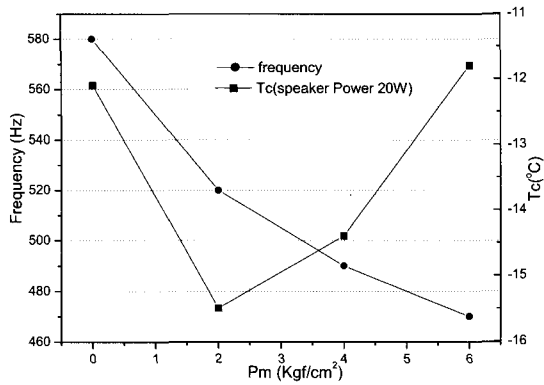


그림 6. 온도비와 작동 주파수 대 냉동기 내 평균 압력 (342 mm 공명기)

Fig. 6. Temperature ratio and operating frequency versus mean pressure of refrigerator (342 mm resonator)

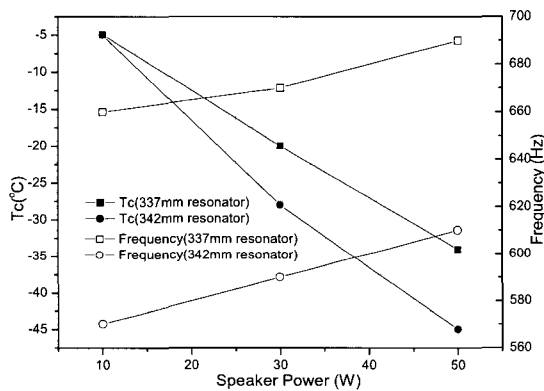


그림 7. 온도비와 작동 주파수 대 스피커 동력

Fig. 7. Temperature ratio and operating frequency versus speaker power

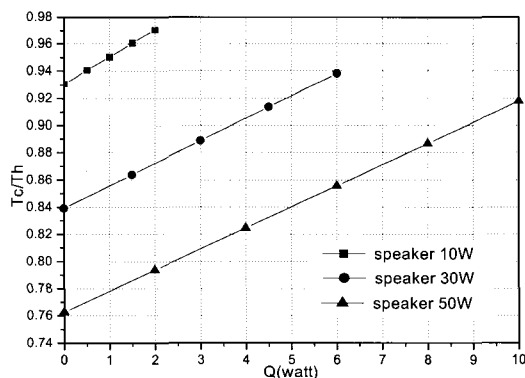


그림 8. 온도비 대 냉동부하 (342 mm 공명기)

Fig. 8. Temperature ratio, versus the electric heater power (342 mm resonator)

제작한 냉동기의 성능을 시험하기 위해 10 W, 30 W, 50 W의 스피커 동력을 사용하였다. 스피커 동력은 냉동기의 순수한 전기적 입력이 될 수 있고 설정한 3개의 스피커 동력들과 단계적으로 선택한 냉동 부하들을 사용하여 실제 냉동기 사용 시 원하는 냉동 온도를 쉽게 알 수 있게 하기 위하여 실험을 실시하였다. 실험하기 전에 진공 펌프를 사용하여 헬륨 관로를 포함, 1/4 파장 냉동기 본체를 2 시간에 걸쳐 진공상태를 만든 뒤 4 kg_f/cm²의 헬륨을 충전시켰다. 그 다음 같은 업를 반복한 뒤 원하는 헬륨의 압력으로 충전시켜 실험을 시작하였다.

그림 4는 전장 337 mm 길이의 공명관을 사용하고 스피커 동력을 10 W, 30 W, 50 W로 인가시키면서 실험한 도표이다. 작동 주파수는 예비 실험으로부터 5 Hz 간격으로 3 분 동안 주파수 sweeping을 하면서 저온부 온도 추이를 관찰하여 얻어진 결과로 산정 되어 졌으며 스피커 동력 10 W에서 660 Hz, 30 W에서 670 Hz, 50 W에서는 690 Hz로 인가되어졌다. 무부하 상태에서 10 W의 스피커 동력으로 -4.9 °C를, 30 W에서 -20 °C를, 50 W에서 -34 °C를 기록하였다. 매 실험 시 저온부 히터에 투입된 전압을 등간격으로 했기 때문에 측정된 범위에 나타나는 온도비는 선형적으로 나타나고 있다.

그림 5는 그림 4로부터 산출된 데이터를 근거로 계산한 도표이다. 무 냉동부하 상태에서 정상 상태에 도달하는 온도를 시작점으로 하여 이미 산정 해 둔 냉동부하 값의 전압을 넣어 히터로 가열한 뒤 정상상태에 도달하는 온도를 받고 같은 실험을 반복하여 COP를 산출한 다음 카르노COP 와 대비 시켜 도시하였다. 스피커 동력이 커짐에 따라서 냉동 능력이 커지고 효율 또한 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 스피커 동력 50 W에서 약 1.78 %의 가장 큰 COP를 보여주고 있다.

그림 6은 냉매에 가압 실험을 한 도표로서 20 W의 스피커 동력을 사용하였다. 열음향 냉동기에서 헬륨에 가압하는 목적은 공명관 내에 발생한 음압에 의해 입자가 가속함으로써 경계층 내 마찰 손실이 증대하기 때문에 가압에 의해 입자의 속력을 줄이려고 하는 것이 목적이거나 가압을 하면 적판 표면의 열유속의 크기도 작아 지기 때문에 최적 효율의 압력을 실험으로 찾아내야 한다. 대기압에서는 580 Hz를 인가하여 -9.5 °C를, 2 kg_f/cm²의 압력에서는 520 Hz를 인가하여 -15.5 °C를, 4 kg_f/cm²의 압력에서는 590 Hz를 인가하여 -14.4 °C의 최저 도달온도를 기록하여 2 kg_f/cm²에서 가장 낮은 온도강하를 보여 모든 실험에서 기준 압력으로 설정하여 실험하였다.

그림 7은 길이가 다른 두 종류(공명관 총길이 342 mm와 337 mm)의 공명관에 각각 10 W, 30 W, 50 W의 스피커 동력을 가하여 저온부 온도와 주파수의 상관관계를 실험한 결과이다. 본 냉동기의 공명관은 직경이 다른 2단으로 제작되어 있어 실험 결과 냉동 주파수가 비선형 거동을 하고있다. 상황에 따라 변하는 비선형 공명관의 냉동주파수를 찾기 위하여 호플러는 Lock-in amplifier를 사용하였다. 본 실험에서 두 개의 공명관 길이 차는 50 mm로서 냉동주파수는 약 80 Hz의 차이를 보이고 있다. 그것은 헬륨이 965 m/s의 빠른 음속을 가지고 있어 공명관의 길이 차가 적어도 공명 주파수의 차이는 커진다. 실험 중 스피커 동력이 커지면 냉동 주파수가 변화하는 것을 관찰하였는데 공명관의 형상이 2단

5. 결 론

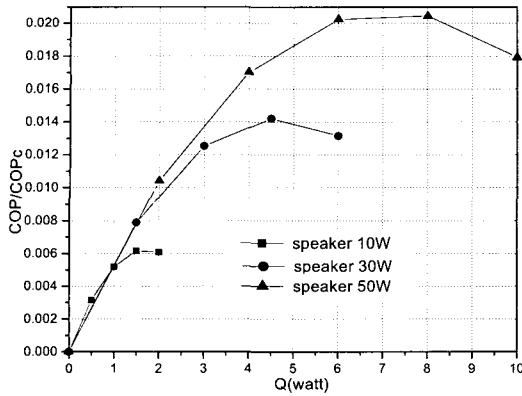


그림 9. 성적계수 대 냉동부하 (342 mm 공명기)
 Fig. 9. Coefficient of performance normalized by Carnot's COP, versus the electric heater power (342 mm resonator)

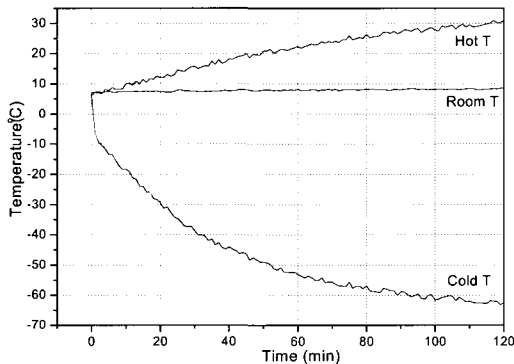


그림 10. 시간에 따르는 온도 형상
 Fig. 10. Temperature profiles according to time.

으로 되어 있기 때문에 공명관 내 와류의 발생과 같은 구조적인 요인 때문에 냉동 주파수가 변화한다고 추정하고 있으나 정확한 것은 정밀한 계측기를 사용한 실험이 있어야 규명이 될 것이라고 생각된다.

그림 8은 342 mm 길이의 공명관을 사용하고 스피커 동력을 10 W, 30 W, 50 W로 인가시키면서 실험한 도표이다. 스피커 동력 10 W에서 570 Hz, 30 W에서 590 Hz, 50 W에서는 610 Hz로 인가되어졌다. 무부하 상태에서 10 W의 스피커 동력으로 -5 °C를, 30 W에서 -28 °C를, 50 W에서 -45 °C를 기록하였다.

그림 9는 그림 8로부터 산출된 데이터를 근거로 계산한 도표이다. 경향은 337 mm 공명관을 사용하여 산정된 COP보다 전체적으로 효율이 향상되고 냉동부하 역시 커진 것을 볼 수 있다. 스피커동력 50 W에서 약 2.04 %로 가장 큰 COP를 보여주고 있다. 337 mm 공명관이 효율이 낮은 이유는 공명관의 길이가 적판에 비해 상대적으로 짧으면 저온부에서 생성되는 음압이 작기 때문에 효율적으로 일을 하지 못하기 때문이다.

그림 10은 342 mm 길이 공명관을 사용하고 100 W의 스피커동력을 주었을 때 나타는 온도 이력들을 보여주고 있다. 주파수는 650 Hz로 작동 2 시간 후 -63 °C를 보이고 있으며 모든 실험 중 실험실 온도는 7~9 °C가 유지되었다.

1/4 파장 열음향 냉동기를 제작하여 각 실험 조건에 따른 냉동 주파수를 찾아내고 그 주파수들을 사용하여 실험에 적용하였다. 냉동 부하를 주고 정상 상태 도달 온도를 측정하는 실험을 단계적으로 수행한 결과 온도비 (Tc/Th)는 냉동 부하가 증가함에 따라 증가하였고 스피커 동력이 증가함에 따라 COP역시 증가를 하였다. 스피커 동력이 증가하면 냉동 주파수는 높아지는 경향을 보이고 냉동기 내 압력이 증가하면 냉동 주파수는 낮아지는 경향을 보인다. 이것은 공명관의 형상이 2 단으로 되어 있고 헬름홀츠 공명기로 연결되는 확대관이 존재하는 등 구조적인 요인 때문이라 사료된다. 50 W 스피커동력을 사용할 때 342 mm 공명관을 장착한 경우 337 mm 공명관을 장착한 경우보다 0.26 %의 COP 향상을 보이며 약 11 °C가 더 강하된다. 본 실험으로부터 실제 냉동부하(10 W 이내)를 본 냉동기에 걸어 주어도 냉동기로서의 역할을 충분히 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C.Sondhauss, "Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasrohren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite," Ann. Phys (Leipzig) 79, 1,1850
- [2] G.Kirchhoff, "Ueber den Einfluss den Wärmeleitung in einem Gas aus die Schallbegung", Ann.Phys(Leipzig).Vol134 P177,1868
- [3] Lord Rayleigh, The Theory of sound, 2nd ed, Vol.2, sec.322,1945
- [4] K. W. Taconis, "Vapor-liquid equilibrium of solutions of 3He in 4He ", Physica, Vol 15, p738,1949
- [5] W. E.Gifford and R. C.Longthworth. "Surface Heat Pumping," Adv. Croyg. Eng., Vol. 11, p.171, 1966
- [6] P.Merkli and H.Thomann. "Thermoacoustic Effects in a Resonant Tube," J. Fluid Mech., Vol. 70, p.161, 1975
- [7] R.L Carter, private communication of atomics International Division of North American Aviation, Inc., 1962
- [8] N.Rott, "Thermoacoustic," Z. Angrew. Math. Phys., Vol. 20, pp. 135~175, 1969
- [9] 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
- [10] T. J.Hofler, "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance," Ph. D. dissertation at University of California, San Diego, 1986
- [11] 박종호, 우삼룡, "열음향 냉동장치의 제작," 응용물리학회지, Vol. 10, pp. 181~185, 1997
- [12] 박철민, 이정권, "열음향 냉동기의 설계 및 개발 (II)," 한국음향학회지, Vol. 14, pp.13~20, 1995

저 자 소 개



송규조 (宋圭祚)
1968년 3월 1일생, 1990년 충남대 공대
기계공학과 졸업, 1996년 동 대학원 기계
공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 기
계공학과 박사과정



박종호(朴鐘鎬)
1951년 3월 6일생, 1973년 전북대 공대
기계공학과 졸업, 1975년 동 대학원 기
계공학과 졸업(공학석사), 1985년 동 대학
원 기계공학과 졸업(공학박사) 현재 충남
대 공대 기계공학과 교수



이성노(李盛魯)
1944년 6월 22일생, 1972년 전북대 공대
기계공학과 졸업, 1974년 동 대학원 기
계공학과 졸업(공학석사), 1976년 동 대학
원 기계공학과 졸업(공학박사) 현재 충남
대 공대 기계공학과 교수