

1/4파장 열음향 냉동기의 제작 및 성능시험

송 규조*, 박 종호 **, 이 성노**, 이 재호***

The Construction and Investigation of The 1/4 Wavelength Thermoacoustic Refrigerator

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

Key Words: Thermoacoustic(열음향), Harmonic Frequency(고조파 주파수), Stack(적판), Cooldown Temperature(최저도달온도)

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 this study, The thermoacoustic refrigerator were constructed. The apparatus is capable of driving closed systems containing He or air at mean pressures ranging from 1-9.3 bar, at frequencies ranging from 100-1000Hz. The resonance characteristics of the thermoacoustic refrigerator were investigated for better performance, The resonance tube is 340.5mm in length. In case of using air as a coolant. Freezing frequency is 174Hz, In case of using He as a coolant. Freezing frequency is 625Hz. Using He, The cold-part temperature of the heat exchanger fell to -23.7 °C after 120 minutes in 70W.

기호설명

T_h : 고온부 온도

T_c : 저온부 온도

T_m : 기체평균온도

T_1 : 기체미소변동온도

P_m : 기체평균 압력

P_1 : 기체미소 변동압력

x_1 : 기체입자 미소거리

∇T : 온도차

1. 서론

각종 냉동기에 사용되고 있는 프레온가스(CFC, Chloro Fluoro Carbon) 냉매는 오존층 파괴의 주범이 되어 환경보호를 위해 사용이 규제받고 있으며 2016년에는 생산이 중단 될 예정이다. 그러므로 대체물질과 함께 새로운 냉동기술들이 개발되고 있다. 열 음향 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. 첫 번째 열음향적

* 회원 충남대학교 대학원

** 회원 충남대학교 기계공학과

*** 원자력연구소

현상의 예는 18세기 유리새공자들은 뜨거운 유리 공에 차가운 유리관을 접합 시킬 때 유리관의 개구부에서 음향이 발생하는 것을 목격한 것으로 **Sondhaus**는 관의 크기와 음향의 크기와의 관계를 실험하였다. 이후 1896년까지 **Rayleigh**⁽¹⁾는 정성적인 방법으로 열음향현상을 정확하게 설명하였다. 두 번째 중요한 현상은 **Taconis** 진동으로 기체를 채운 관에 한쪽 끝은 상온상태로 유지시키고 한쪽 끝에는 액체 헬륨(4° K)에 접촉시키면 극도로 높은 진폭이 유도되는 진동이 유발하게 된다. **Taconis**도 정성적인 방법으로 그 현상을 설명하였다. 첫 번째 음향학적 열펌프의 예는 맥동관 냉동기인데 **Gifford**와 **Longworth**⁽²⁾는 밀폐관 끝에 저주파와 고진폭 진동을 인가시켜 $T_c/T_h = 1/2$ 의 온도비를 발생시키는데 성공하였다. 동시대에 **Merlki**와 **Thomann**⁽³⁾은 정온을 유지시킨 관벽에 정재파를 발생 시켰는데 속도배 근처 지역으로부터 인접 압력배 지역으로 열이 이동하는 것을 확인하였다. 열음향 냉동기의 성능을 대폭 향상시킨 사람은 **Carter**로 1962년에 관내부에 평행 판의 집적체인 적판을 설치하여 **Sondhaus** 효과를 배가 시켰다. **Kirchoff**는 1868년에 첫 번째로 열음향 효과를 이론적으로 설명하려고 시도하였으며 그 내용은 기체 중의 음파와 등온 덕트 벽 사이의 열 확산에 기인한 덕트 내 음파의 감쇠에 대한 것 이었다. 이후 1969년에서야 비로서 **Rott**^(4,9)가 열음향 열펌프와 냉동기에 성공적으로 적용될 수 있는 열구동 진동과 음향 열전달에 대한 이론들을 완성하게 되었다. 1983년 **Wheatley**⁽¹⁰⁾의 해 열음향 냉동기의 실용화 연구가 시작되어 1988년 **Hofler**⁽¹¹⁾는 중음 스피커를 구동기로 하고 공명기 내에 헬륨기체를 10기압으로 채우고 플라스틱 적판과 구리 열 교환기를 이용하여 500Hz로 공진시켜 영하 70°C의 저온을 얻어 실용화 가능성을 보였다. 최근 선진국에서는 열 음향 엔진과 열 음향 냉동기를 결합한 자동차용 공기조화장치, 우주선용 냉각기(STAR, 작동주파수 400Hz), 레이더 전파 발생장치 냉각용, 소형 냉장고(TALSR, 작동주파수 320Hz)가 실용화되었으며, 대용량, 대규모의 열 음향 냉동기의 실용화를 위하여 연구가 진행되고 있다.

국내에서도 박⁽¹²⁾ 등은 **Hofler** 냉동기를 모델로 하여 대기압의 공진기에 중음 스피커를 340 Hz로 구동하여 냉동효과를 관찰하였으며, 이에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 실제로 1/4파장 열음향 냉동기를 제작하고 공기 및 헬륨을 작동 매질로 사용하여 성능을 시험 하였다. 작동주파수를 100Hz에서 1000Hz까지 변화시키면서 공명관내 생성되는 공명주파수에서 온도거동과 작동매질에 가압을 하면서 발생하는 주파수와 온도변화 등을 고찰하였다.

2. 열음향 냉동기 작동특성

Hofler형 열 음향냉동기는 Fig.1에 보인 바와 같이 정재파를 만들어 주는 스피커, 1/4파장의 정재파를 유도시키는 공명관, 공명관에 개방조건을 만들어주는 **Helmholtz** 공명구, 그리고 공명관 내에 온도차를 발생시키는 적판, 그리고 열을 방출하고 흡수하는 고·저온 열 교환기로 구성된다.

열 음향 냉동기의 작동원리는 공명관 내 적판을 따라서 음압에 의하여 작동기체가 진동할 때 단열압축과 팽창에 의하여 온도변화가 발생하는 것이다. 열 음향장치의 구동 주파수는 기체의 음속과 공명기의 길이의 함수관계로 결정되며, **Hofler**형 냉동기의 공명관에는 1/4 파장의 정재파가 사용된다. Fig.2의 열흐름 개략도를 보면 적판을 따라서 기체가 진동할 때 온도변화를 동반하게 되는데 온도변화의 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창에 기인하며 나머지는 적판으로의 열전달 결과이다. 기체입자의 진동중심을 $x=0$, 진동거리를 x_1 이라하면 진동하는 기체입

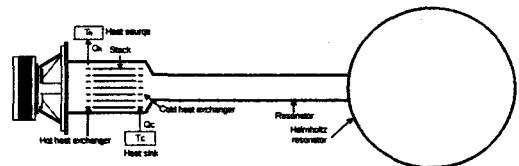


Fig. 1 Schematic diagram of quarter wavelength thermoacoustic refrigerator

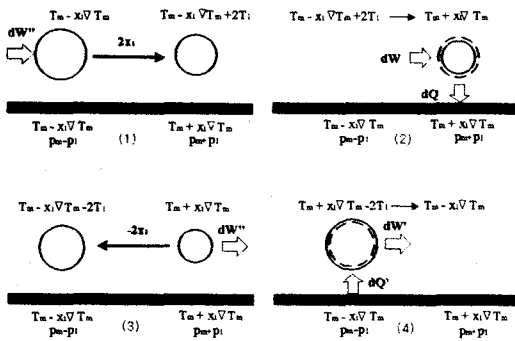


Fig 2. Typical fluid parcels in a thermoacoustic refrigerator's stack

자에 근접한 저온 측 판의 온도는 $T_m - x_1 \nabla T$ 이고 고온측판의 온도는 $T_m + x_1 \nabla T$ 이다. 우선 첫 번째 단계로 기체 입자가 $2x_1$ 만큼 움직여 단열 압축된다. 그러면 온도는 $T_m - x_1 \nabla T$ 에서 $T_m - x_1 \nabla T + 2T_1$ 으로 상승하게된다. 두 번째 단계로 $2T_1 > 2x_1 \nabla T_1$ 이라면 등압조건에서 기체 입자의 열은 판을 향하여 전달 되어 기체온도는 $T_m + x_1 \nabla T$ 가 된다. 세 번째 단계로 기체입자는 원위치로 돌아오면서 단열 팽창에 의해 온도는 $T_m + x_1 \nabla T - 2T_1$ 로 낮아지게 된다. 네 번째 단계로 판의 온도는 기체입자의 온도 보다 높으므로 기체는 열을 흡수하여 $T_m - x_1 \nabla T$ 의 원래 온도가 된다. 이 사이클은 소리의 진동으로 발생하는 일에 의해 열 dq 가 펌핑되고 전체 판에 걸친 음파의 종진동을 매개로 기체입자들도 같이 진동하면서 열이 인접한 기체 입자로 계속 전달이 되며 기체 입자는 음파의 저압위상 동안 열적 팽창을 하고 고압위상 동안 열적 수축을 하기 때문에 입자는 정제과로부터 음향일을 흡수한다. 스피커의 중저음 영역에서 발생한 음향동력은 적 판에서 기체입자들에 의해 흡수된다

3. 실험장치 및 방법

실험을 바탕으로 설계된 열 음향 냉동기에 공

기와 헬륨을 사용한 냉동효과를 실험하기 위하여 Fig.3에 보인바와 같이 측정장치들을 설치하였으며 Photo. 1은 진공통을 배제시킨 실험 냉동기의 전경을 보이고 있다. 내경 150mm 깊이 160mm의 원통인 스피커 하우징은 황동재질로서 내측에 스피커를 고정시키면서 기체의 압력을 유지시키는 역할을 하고 있다. 스피커 하우징 덮개는 황동재질로 스피커 동력선과 열전대들을 외부로 인출할 수 있는 feedthrough를 설치하였고 작동기체를 인입시키기 위한 피팅과 밸브등을 설치하였으며 냉동기 내 압력을 인지하기 위하여 압력변환기를 설치하였다. 음향 동력원은 고성능 확성기에 사용되는 Horn driver(SU-150EF 150watt)를 사용하였으며 냉동기에 공급한 구동 주파수는 합수발생기(Gold Star, F-8002)를 사용하여 정현파 신호를 발생시킨 뒤 증폭기(Inkel, MA430)에서 증폭한 후 스피커를 구동시켰다. 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec, PM300)로 측정하였다. 디지털 오실로스코프(Lecroy, 9310AM)에 연결하여 주파

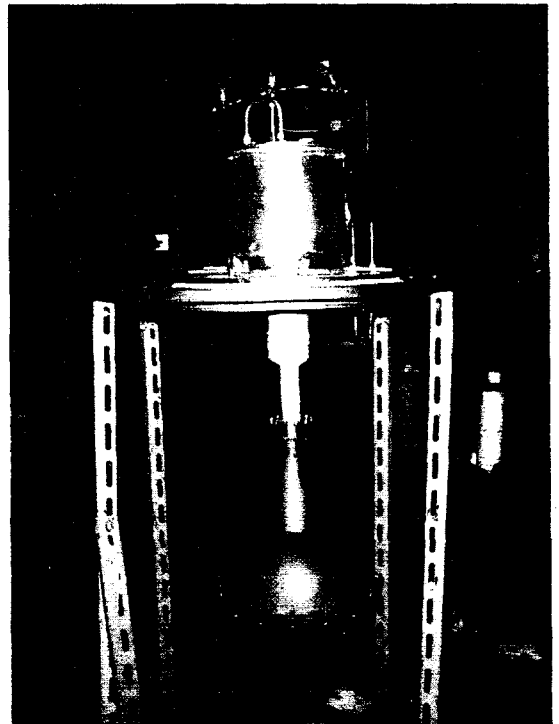


Photo. 1 Photograph of 1/4 Wave Thermoacoustic Refrigerator

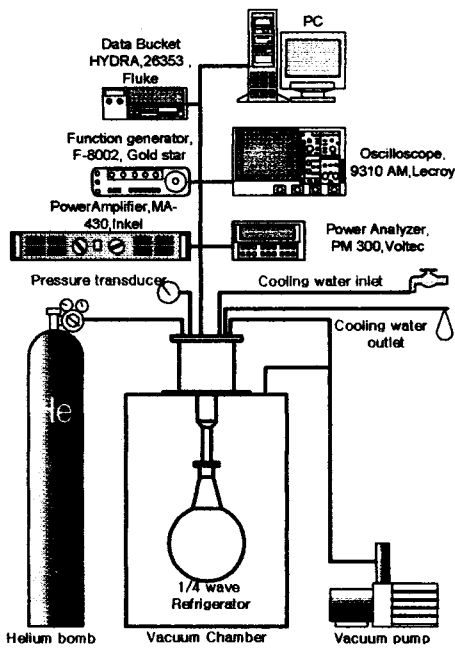


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental arrangement.

수를 정밀측정 하였다. 스피커 하우징에 인접하여 고온 열교환기를 설치하였는데 직경 300mm, 두께 5mm의 구리를 사용하였다. 중앙에 40mm 직경의 원안에 지름 1.5mm의 구멍을 1.5mm의 간격으로 방전가공하여 공명기 쪽으로 음파를 보낼 수 있게 하였고 적판에서 발생한 열을 방출할 수 있게 하였다. 고온 열교환기 구리판의 또 하나의 역할은 진공통과 냉동기를 연결시키면서 진공을 유지시켜준다. 발생한 음파를 매개로 공명관 내 기체입자들과 열교환을 하면서 열을 펌핑시키는 부품인 적판은 0.075mm 두께의 Mylar 박판에 직경0.37mm 뉘시 줄을 3~6mm 간격으로 접착한 뒤 이것을 말아서 직경 40mm와 길이 80mm가 되도록 제작하여 사용하였다.

저온 열교환기는 펌핑된 저온을 유지시키는 열저장소의 기능을 하고 있으며 차후 COP를 산정할 때 열부하역할을 담당할 수도 있다. 직경 40mm, 두께 2.5mm의 구리 재질이며 고온 열교환기와 같은 재질을 가진 수백개의 1.5mm 구멍을 방전가공하여 제작하였다. 1차단열제인 테프론

수지 실린더로써 적판, 저온 열교환기, 축소관 까지 이르는 테이퍼부를 단열 하였는데 적판에서 펌핑된 열을 외부로 유출되지 못하도록 금속공명기내부와 적판사이에 위치시켰다. 실린더부는 내경 40mm, 두께 5mm이며 테이퍼부는 45도의 경사도, 밑면 10mm으로 축소부 직경은 20mm으로 축소부에서는 기체유동 시 와류로 인한 손실을 방지할 목적으로 라운딩 처리를 하였다.

2차단열은 단열테이프를 사용하였는데 저온 열교환기와 축소관 부근에 중점적으로 단열 테이프를 사용하였다. 3차단열은 진공용기를 사용하였는데 외부로 유입되는 복사열을 방지 할 목적으로 내경 38cm, 깊이 74cm의 강철제 용기를 사용하여 실험 중 진공을 유지시켰다. 공명기 본체는 직경이 다른 실린더로 구성되어 있는데 대단부 안지름은 50mm, 소단부 안지름은 20mm이며 두께는 공허 2mm 스테인레스 재질의 shell 로 구성되어 있으며 대단부와 소단부의 연결은 45도 경사의 스테인레스 shell 테이퍼로 MIG용접하여 연결하였고 다른 부품과의 연결은 플랜지를 사용하였다. 공명기 본체의 총길이는 197.5mm이다. 헬륨홀츠공명기는 음파를 1/4파장으로 만들어 주는 개방관 역할을 해주며 동시에 압력저장용기의 구실도 하고 있다. 테이퍼부와 구형 공명기 일체로 구성되어 있으며 테이퍼부의 소단부 내경은 29mm, 대단부 내경은 82mm, 길이는 100mm이고 두께는 4mm으로 플랜지로 다른부품을 체결 하였다. 구공명기의 내경은 150mm, 재질은 강이며 NC 선반으로 제작하였다. 헬륨을 사용하여 실험할 때 진공 펌프를 사용하여 헬륨관로를 포함하여 1/4파장 냉동기 본체를 진공을 뽑고 1bar의 헬륨을 충전 시킨후 다시 진공을 뽑고 원하는 헬륨의 압력으로 충전 시켰다. 실험 하기 전에 냉동기에 모든 밸브를 잠근 후 진공용기로 진공관로를 바꾼 뒤 진공펌프를 작동시키고 실험과정 중에서도 계속 진공펌프를 작동시키면서 실험을 수행하였다. 적판 저·고온부에서의 온도측정은 K형 열전대를 설치한 뒤 Data logger(Fluke, HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 데이터를 수집하였다.

4. 실험결과 및 고찰

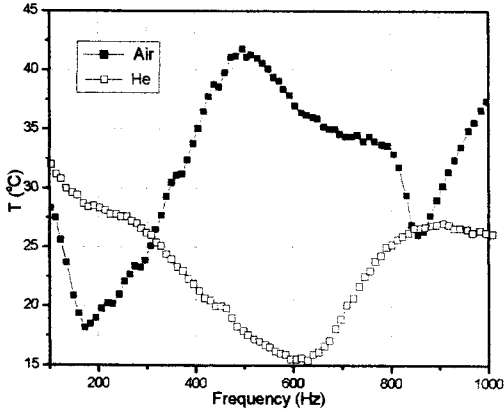


Fig.4 Temperature profiles of Air and He

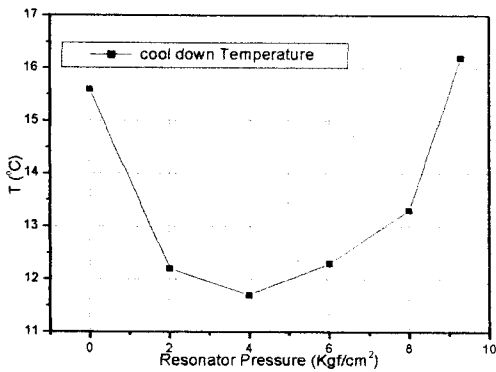


Fig.5 Cooldown Temperature .vs. Resonator Pressure (Speaker power: 10W)

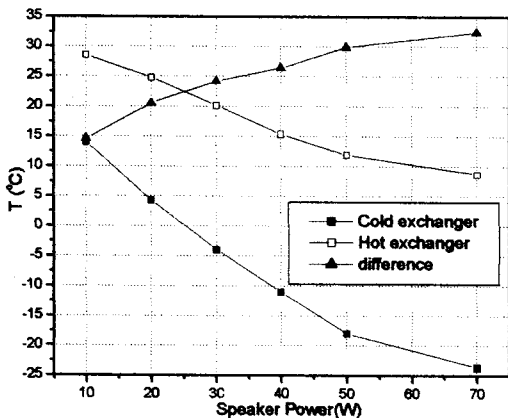


Fig.6 Cooldown Temperature .vs. Speaker Power

Fig.4는 작동 유체인 공기와 헬륨을 사용하여 100Hz에서 1000Hz까지 약 10Hz 간격으로 변화시키면서 각각의 주파수에 대한 온도이력을 표시한 그래프로 공명관 내 압력은 공히 대기압으로 하였다. 공기를 사용하여 실험한 결과 100-1000Hz에서 2개의 고조파가 발생하였으며 헬륨을 사용하여 실험한 결과 하나의 고조파가 발생하였음을 알 수 있다. 공기의 경우 1차 고조파는 174Hz 부근에서 3차 고조파는 855Hz 부근에서 발생하였다. 헬륨의 경우 1차 고조파는 625Hz 부근에서 단독으로 발생하였다. 그 이유는 헬륨이 공기의 음속에 비해 약 3배의 음속을 가지고 있기 때문에 정해진 공명관의 길이에 대해 고조파가 발생하는 주파수가 헬륨이 더 높은 주파수에서 1차 고조파가 발생하였다. 최저온도는 공기의 경우 1차 고조파는 18.2도, 헬륨의 경우 1차 고조파는 15.5도로 약 3도의 온도차를 보이고 있다.

Fig.5는 공명관에 헬륨을 채우고 처음 대기압 상태로 실험을 시작하여 매 2 Kgf/m²마다 가압하여 최종으로 9.3 Kgf/m²에 도달할 때 까지 가압하여 실험한 도표이다. 공명기 압력 4 Kgf/m²에서 가장 낮은 온도에 도달 하였다. 헬륨에 가압하는 목적은 공명관 내에 발생한 음압에 의해 입자가 가속함으로써 경계층 내 마찰 손실이 증대하게된다. 따라서 가압 함으로서 입자의 속력을 줄이려고 하는 것이 목적이나 가압을 하면 적 판표면의 열유속도의크기도 작아 지기 때문에 최적 효율의 압력을 찾아 내야 한다.

Fig. 6은 헬륨을 사용하여 실험초기에 스피커 동력을 10W로 입력한 다음에 1시간 간격으로 10W 씩 증가 시키면서 실험한 온도 이력들이다. 처음 10W 와 20W에서는 한시간 당 10도 씩의 온도 하강이 있었는데 고출력으로 가면서 점차 하강 온도가 둔화 되고 있음을 알 수 있다. 저온부에서 고온부로 열전도가 되면서 고온 부에서도 온도가 하강하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7은 70W의 스피커동력을 주었을 때 나타나는 온도 이력들을 보여주고있다. 약 30도의 온

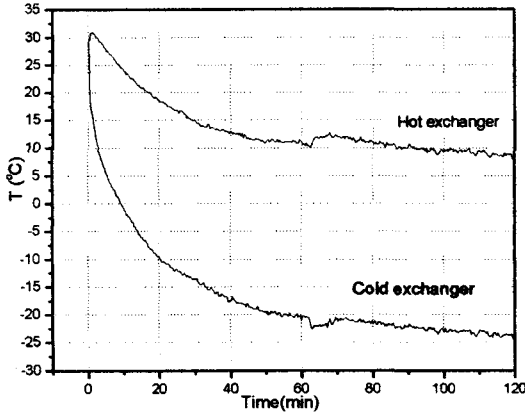


Fig.7 Temperature profiles of Hot and Cold exchanger (70W Input)

도차를 보여주고 있으며 실험 외기온도가 29도이므로 하강한 온도는 약 53도에 달한다.

5. 결 론

1/4파장 열 음향 냉동기를 제작하여 구동 주파수, 그리고 공명기 압력변화에 대한 최적조건을 찾기 위한 실험연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대기압을 사용한 실험에서 공기의 경우 174Hz, 헬륨의 경우 625Hz가 최적냉동 주파수이다.
- (2) 냉동기에 헬륨을 충전했을 경우 4 Kg/m^2 일 때 최적의 상태에 도달하였다.
- (3) 4 Kg/m^2 의 헬륨을 충전하고 420Hz에서 120분동안 구동시킨 결과 영하 23.7에 도달하였다.

참 고 문 헌

- (1) Lord Rayleigh, 1945, *The Theory of sound*, 2nd

ed, Vol.2, sec.322

- (2) Gifford. W. E and Longthworth. R. C., 1966, "Surface Heat Pumping," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol. 11, p. 171
- (3) Merkli. P. and Thomann. H., 1975, "Thermoacoustic Effects in a Resonant Tube," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, p. 161
- (4) Rott. N., 1969, "Thermoacoustic," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 20, pp. 135~175
- (5) Rott. N., 1969, "Damped and Thermally Driven Acoustic Oscillations in Wide and Narrow Tubes," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 20, p. 243
- (6) Rott. N., 1969, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part II Stability Limit for Helium," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 24, pp. 54~72
- (7) Rott. N., 1975, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part III Second-Order Heat Flux," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 26, pp. 43~49
- (8) Rott. N., 1976, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part IV Tubes with Variable Cross-section," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 27, pp. 197~224
- (9) Rott. N., 1976, "Thermally Driven Acoustic oscillations. Part V Gas- Liquid Oscillations," *Z. Angew. Math. Phys.*, Vol. 27, pp. 325~334
- (10) Wheatley. J., Hofler. T., Swift. G. W., and Migliori. A., 1983, "An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 74, pp. 153~170
- (11) Hofler. T. J., 1986, "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance," Ph. D. dissertation at University of California, San Diego
- (12) 박종호, 우삼룡, 1997, "열 음향 냉동장치의 제작," *한국 물리학회지*, Vol. 10, pp. 181~185
- (13) 박철민, 이정권, 1995, "열 음향 냉동기의 설계 및 개발(II)," *한국음향학회지*, Vol. 14, pp. 13~20