

1/2파장 열음향 냉동기의 공명관 길이 의존 특성 연구

송 규조*·박 종호**·고 득용***·김 효봉***

An Experimental Study that depend on the Resonance Tube Length for a Thermoacoustic Refrigerator of 1/2 wave

Song Kyu Joe , Park Jong Ho , Koh Deuk Yong , Kim Hyo Bong

Key Words: Thermoacoustic(열음향), Harmonic Frequency(고조파 주파수), Stack(적판), Thermal Penetration Depth(열침투깊이), Viscous Penetration Depth(점성침투깊이)

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 resonance characteristics of the thermoacoustic refrigerator were investigated for better performance, varying the length of Resonant Tube to 400mm ~850mm. In order to determine the optimum position of stack in the resonance tube and the frequency, the simple $\lambda/2$ thermoacoustic refrigerator was constructed. It was used air as a coolant. in the fifth harmonic, it was taken the highest Δt that was 52.6 °C at 827Hz in 400mm tube with 40mm stack.

기호설명

δ_x : 열 침투깊이
 μ : 동점도
 ρ : 밀도
 f : 주파수
 K_p : 적판의 열전도도
 K_g : 기체의 열전도도
 P_o : 최고 음향압력진폭
 ΔT : 온도차
 T_m : 기체의 평균온도
 c_p : 단위 질량당 등압 열용량

δ_v : 점성 침투깊이
 ρ_m : 평균 기체 밀도
 c : 음속
 σ : Prandtl 수
 d_p : 적판 두께
 d_g : 적판 간격
 γ : 비열비
 k : 전파상수
 Δx : 적판의 길이

1. 서론

각종 냉동기에 많이 쓰이는 염화 불화탄소 계 열의 냉매는 환경을 심하게 파괴하기 때문에 곧 사용 금지될 것이며 대체냉매를 개발하기 위해 많은 개발과 노력이 기울여 지고 있다. 그것과는 상반 되게 극저온 특수냉동기들은 환경에 무해한 헬륨 등을 사용하는데 그 중의 하나가 바

* 회원 충남대학교 대학원
 ** 회원 충남대학교 기계공학과
 *** 한국 기계연구원

로 열음향 냉동기이다. 스피커와 같은 음향 발생장치가 기존 냉동기의 압축기로 대체되어 있으며 구조가 비교적 간단하여 유지 보수가 쉽고 기계적 신뢰도가 높다. 음파는 압력과 입자의 진동속도에 결부되어 있을 뿐만 아니라 온도진동은 압력변화와 밀접한 관계가 있다. 이런 진동들은 고체벽면에서 상호작용으로 열음향 효과를 일으킨다. 너무 작아서 인지 할 수는 없지만 밀폐된 방안에 저주파를 방사하면 열펌프나 냉동기로 작용시킬 수 있다. 열음향은 1777년 Higgins가 커다란 관에서 수소불꽃 실험을 통해 음향진동 현상을 발견하면서 시작되어 Sondhauss 등에 의해 음향진동에 대한 연구가 진행되었으며 음향진동기로는 1850년에 그가 제작한 Sondhauss Tube가 가장 단순하고 오래되었다. Sondhauss Tube는 액체 헬륨 사용자들에게 Tacosis 진동기로 잘 알려져 있는데 극저온 냉동장치에서 가스가 주입된 관이 상온에서 극저온에 접근할 때 매우 큰 진폭을 갖는 Tacosis진동 발생에 대하여 1954년 Clement^[1] 등, 1980년 Yazaki^[2] 등에 의해 계속 연구되었다. Feldman^[3]은 Sondhauss 진동기에 적판(stack)을 설치하여 열음향현상을 실험·분석하였으며, 600W의 열에서 27W의 음향동력을 얻을 수 있었다. 1966년 Gifford^[4] 등은 관속의 가스에 매우 낮은 주파수와 높은 진폭을 가진 압력진동에 의한 냉동효과를 제시하였으며, 1975년 Merkli^[5] 등이 실린더 형상, 그리고 공진하는 공명기내 최대 속도 위치에서 냉각효과가 발생하는 것을 실험하고, 공명기내 가스의 압력변화와 유동에 의한 위상차로 온도변화가 발생하여 관속에서 열 펌프작용이 일어남을 규명하였다.

초기의 열음향 기관들은 공명기의 직경이 단지 열침투깊이의 수배에 달할 뿐이었다. 대구경의 공명기와 지금의 적판과 열교환기를 장치하여 전체적인 power 향상을 가져온 것은 1960년 Robert L. Carter의 엔진부터이다. 120년 전 Rayleigh가 열음향 현상을 이론적 이해를 통하여 발전이 이루어졌지만 정확한 열음향이론은 Rott^[6~11]에 의해 1970년에서야 완성이 되었다. 1983년 Wheatley^[12] 등에 의해 열음향 냉동기의 실용화 연구가 시작되어 1988년 Hofler^[13]는 실용화를 위한 냉동기의 성능 연구에서 증음 스피커를 구동기로 하고 공명기내에 헬륨기체를 10기압으로 채우고 플라스틱 적판과 구리 열교환기를 이용

하여 500Hz로 공진시켜 영하 70°C의 저온을 얻을 수 있었다. 미국은 이 분야에서 많은 연구를 하고 있는데 특히 국립 Los Alamos 연구소와 Naval Postgraduate School에서 열음향에 관련된 여러 가지 극저온 냉동기를 개발하고 있다.

국내에서도 열음향에 대한 이론과 성능향상을 위한 연구를 진행하고 있으나 외국의 수준에 는 이르지 못하고있고 냉장온도 수준 밖에 이르지 못하고 있다. 따라서 열음향 냉동기의 성능을 개선하기 위해서 본 논문에서는 열음향 냉동기의 성능을 좌우하는 공명관의 길이에 따른 최적 구동 주파수와 적판의 길이 그리고 위치에 대한 냉동효과를 찾을 목적으로 실험용 반파장 열음향 냉동기를 제작하고 구동주파수를 100Hz에서 1000Hz까지 변화시키면서 공명관내 생성되는 n차 공명주파수에서 온도기동 그리고 길이가 다른 적판의 공명관내 위치에 따른 온도변화를 고찰하였다.

2. 열음향 냉동 원리

본격적으로 열음향 냉동기가 제작된 것은 1980년대 Los Alamos National Laboratory의 Hofler에 의해서였다. 기본원리는 열음향기관과 유사하지만 적판에서의 압력구배는 더 낮다. Fig.1에서와 같이 적판(Stack)을 따라서 기체가 진동할 때 온도변화를 동반하게 되는데 온도변화의 주원인은 음압에 의한 기체 단열 압축과 팽창에 기인하며 나머지는 적판으로의 열전달 결과이다. 기체입자의 온도는 정재파로 인한 단열 팽창에 의해 국소 관 온도 이상으로 상승하기 때문에 원편의 기체 입자는 적판으로 열을 방출한다. 반면 단열 팽창이 국소 관 온도 이하로

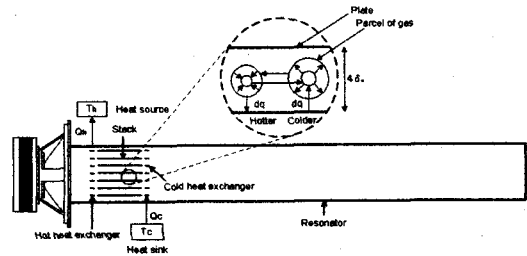


Fig. 1 Schematic diagram of $\lambda/2$ wavelength Thermoacoustic refrigerator.

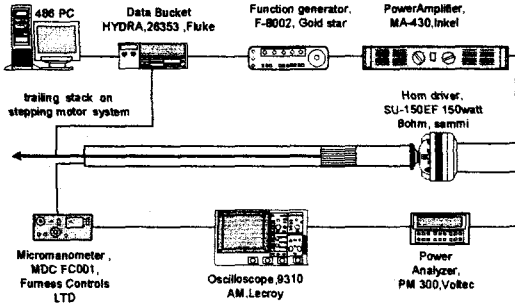


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental arrangement.

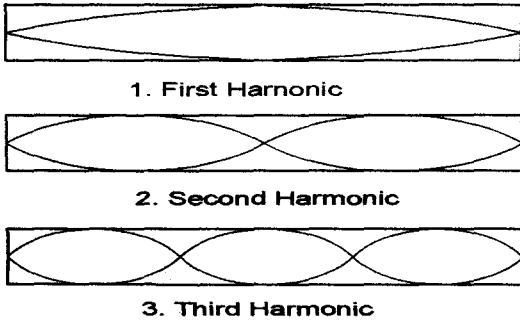


Fig. 3 Closed Tube, $n \frac{\lambda}{2}$, $n=1,2,3$

하강하기 때문에 오른쪽기체입자는 적판으로부터 열을 흡수한다. 그런 식으로 입자들은 각 미소 사이클들 간의 열교환과 열전달을 하면서 고온 열교환기에서 Q_h 를 방출하고 저온 열교환기에서 Q_c 를 흡수하면서 적판을 따라 온도구배를 형성하게 된다. 기체 입자는 음파의 저압위상동안 열적 팽창을 하고 고압위상동안 열적 수축을 하기 때문에 입자는 정재파로부터 음향일을 흡수한다. 저음스피커에 의해 발생한 음향동력 W 는 적판에서 기체입자들에 의해 흡수된다. 열음향 기관의 경우 온도 구배가 가파르며 왼쪽으로 이동하는 동안에 단열압축 된 후 그 지역의 적판온도보다 높게된다 따라서 그 지역에서 적판으로 열을 방출한다. 반대로 냉동기인 경우 완만한 온도 구배를 가지는데 기체 입자는 왼쪽으로 가는 동안 단열 팽창한 후 그 지역의 온도 보다 낮아져서 온도가 더 높은 적판지역으로 열을 흡수한다. 1/2파장 냉동기가 구동할 때 압력배는 관의 양 끝에 위치하고 압력 절점은 공명기 중간부에 위치한다. 작동유체는 통상 고압 헬륨을 사용한다.

고압은 냉동기의 단위부피 당 동력을 증가시키고 불활성 기체는 높은 음속을 가지고 있으며 열전도 또한 높아 power density를 증가시킨다.

3. 실험장치 및 방법

열 음향 냉동기의 성능을 좌우하는 공명관 길이에 따른 최적 구동 주파수와 적판의 길이 그리고 공명관 내 적판위치에 대한 냉동효과를 실험하기 위하여 Fig.2에 보인바와 같이 반파장 냉동기를 제작하고 측정장치를 설치하였다.

음향 동력원은 고성능 확성기에 사용되는 Horn driver(SU-150EF 150watt)를 사용하였으며, 공명관은 열전도가 낮고 적판의 위치 및 상태를 쉽게 모니터 할 수 있는, 내경 40mm, 외경 50mm 크기의 아크릴 관으로 제작하였으며 적판 양단에 발생하는 순수한 온도차를 보기 위하여 단열은 하지 않았다. 공명관 끝 부분에는 아크릴 관으로 적판과 연동할 수 있는 rod의 통과 hole을 내었다. 적판은 0.06mm 두께의 Kapton 박판에 직경 0.37mm 낚시 줄을 3~6mm 간격으로 접착한 뒤 이것을 말아서 직경이 40mm가 되도록 하여 길이 100mm, 70mm, 40mm의 적판 3개를 제작하여 사용하였다. 열을 흡수하여 방출하기 위한 저·고온 열 교환기는 적판에서 직접 열전대로 온도변화를 측정하였기 때문에 본 실험에서는 설치하지 않았다. 적판 저·고온부에서의 온도측정은 K형 열전대를 설치한 뒤 Data logger(Fluke HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 3분 마다 데이터를 수집하였다. 냉동기에 공급한 구동 주파수는 함수 발생기(F-8002, Gold Star)를 사용하여 정현파 신호를 발생시킨 뒤 증폭기(Inkel MA430)에서 증폭한 후 스피커를 구동시켰다. 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec PM300)로 측정하였다.

실험은 적판이 고정될 때 주파수를 100Hz에서 1000Hz까지 약 10Hz 간격으로 변화시키면서 온도차를 모니터하였고 주파수가 고정될 때는 각각의 공명기의 길이까지 10mm간격으로 공명관 길이까지 후진하면서 온도차를 모니터하였으며 길이가 다른 3종류에 대하여서도 적판의 위치를 변화시키면서 적판 양단의 온도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

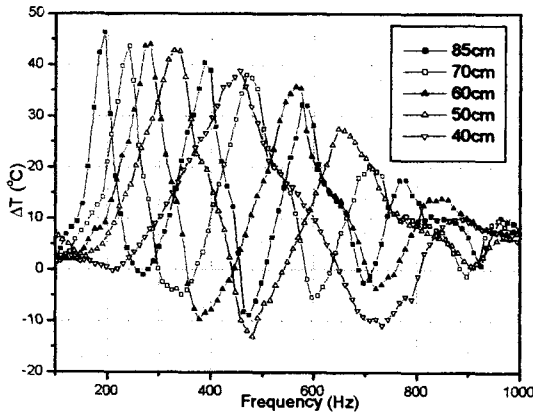


Fig. 4 ΔT profiles with the frequency sweeping and the resonator length.

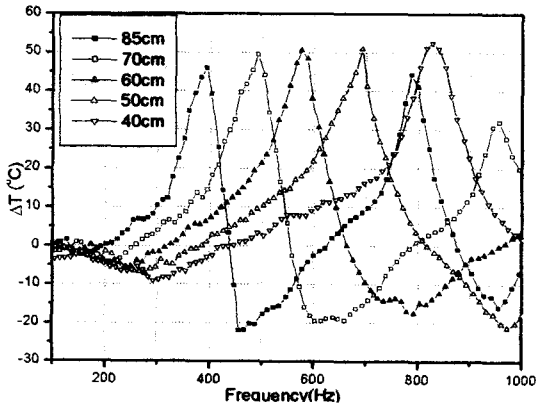


Fig. 5 ΔT profiles with the frequency sweeping and the resonator length.

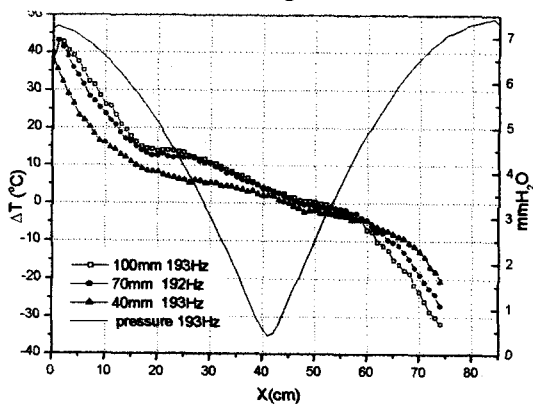


Fig.6 ΔT profiles & pressure profile with resonator length according to X axis. (1st Harmonic, 850mm Tube)

Fig.3는 막힌 관에서 정재파가 형성된 하모닉들의 형태를 도시한 것으로 first 하모닉의 경우 막힌 관 끝에서 기체 입자의 진동압력은 최대이고 관 중간에서 최소의 진동압력을 보인다. 구동 주파수를 10Hz 간격으로 100Hz에서 1000Hz까지 변화시킬 때 각각의 공명관(850mm, 700mm, 600mm, 500mm, 400mm)에서 주파수 증가에 따른 온도분포는 Fig4와 같이 나타난다. 100mm길이의 적판을 사용하였고 구동음향동력을 $10 \pm 0.1W$ 로 조정하면서 측정하여 입력 구동음향동력에 따른 온도차 변화를 고찰하였다. 100Hz에서 1000Hz까지 공명관의 길이에 따라 하모닉의 수가 혼재하고 있는데 850mm관의 경우 5개, 400mm관의 경우 2개로 큰 차이를 보이고 있다. 전 주파수를 통하여 하모닉이 증가할수록 온도차가 줄어드는 경향을 보이고 있고 공명관의 길이가 증가할수록 온도차 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 1차 하모닉 근방에서 생성되는 주파수 대역은 실험된 공명관에 대해 100Hz에서 500Hz정도이며 관의 길이가 짧을수록 주파수대가 상승하고 있음을 알 수 있다. 스피커 쪽 공명관 끝에서 적판을 10mm 후진한 위치에서 주파수 sweeping 한 결과 최고 온도차는 1차 하모닉 영역에서 나타나며, 공명관의 길이가 길수록 온도차가 크게 나타나며 최고온도차는 850mm공명관에서 46.4°C의 최고 온도차가 발생하며 구동주파수는 약 193Hz인 것을 알 수 있다. 1차 하모닉에서 공명관의 길이에 따라 38.8°C에서 46.4°C까지 온도차 변화를 보이고 있어 주파수와 공명관의 길이에 따르는 온도차는 함수관계를 이루고 있다.

Fig.5는 각 공명관들에 대해 2차 하모닉 대 주파수에서 최대 온도차를 보이는 공명관 내 위치에 적판을 고정하고 100Hz에서 1000Hz까지 10Hz씩 주파수를 변환시키면서 온도차를 측정도시한 것이다. 2차 하모닉 부근에서는 단위 $\frac{1}{4}\lambda$ 파장이 1차 하모닉에서 보다 짧고 그에 따라 40mm 적판에서 100mm 적판 보다 큰 온도차를 보이기 때문에 2차 하모닉의 최대 온도차를 보기 위해서 40mm 적판으로 교환했다. 2차 하모닉은 1파장에 해당되는데 1파장의 중간부근인 두 번째

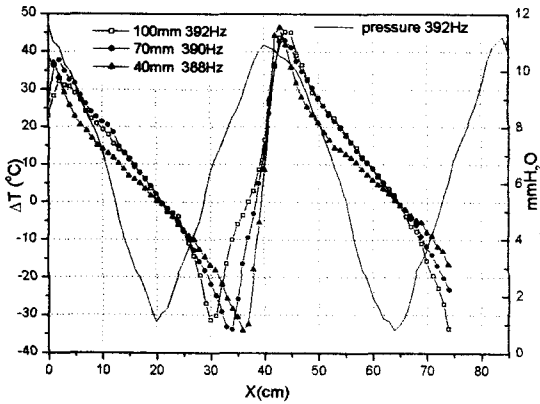


Fig. 7 ΔT profiles & pressure profile with resonator length according to X axis. (2nd Harmonic, 850mm Tube)

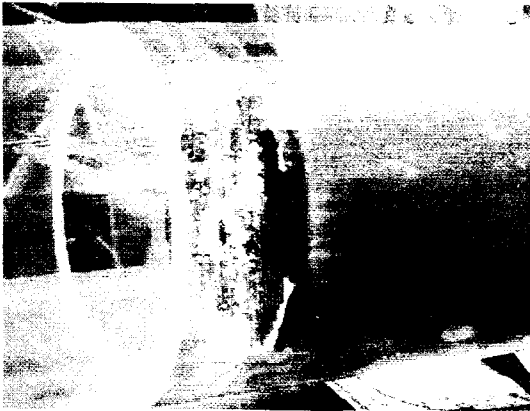


Photo. 1 Photograph of frost on cold part of stack.

배에서 가장 큰 온도차를 보인다. 850mm관에서 2차, 4차 하모닉이 보여지고 가장 짧은 400mm관에서는 2차하모닉만 보여지고 있다. 온도차는 공명관 길이에 역비례하는데 400mm관에서 52.6°C의 최대 온도차를 보여주고있다.

Fig.6은 850mm 공명관의 압력 상태와 100mm, 70mm, 40mm 적판들의 온도차를 나타내고 있다. 압력은 미소압력계(Furness Control MDC FC001)를 사용하여 Pitot tube로 측정하였고 측정된 최대압력진폭은 7.5mmH₂O이며 공명관 내 41cm 되는 지점에서 최소의 압력을 나타내고 있다. 1/4파장 냉동기 압력 profile은 관 끝에서 최소 압력점에 미치지 않아 냉동주파수하고 관의

1차 정상파 주파수가 맞지 않았으나 1/2파장 냉동기에서는 관끝에서 거의 정확하게 최고압력을 나타내고있다. 그것은 냉동주파수하고 관의 1차 정상파 주파수가 유사하다는 것을 뜻한다. 적판 중 100mm에서 가장 큰 43°C의 온도차를 보이고 있다.

Fig.7은 2차 하모닉으로 400mm 공명관 내의 압력 상태와 100mm, 70mm, 40mm 적판들의 온도차를 나타내고 있다. Pitot tube로 측정된 최대압력진폭은 11.5mmH₂O이며 공명관 내 200mm 지점과 640mm 되는 지점에서 최소의 압력을 나타내고 있다. 3차이상의 하모닉에서는 $\frac{1}{4}$ λ 의 단위 길이가 짧아지기 때문에 상대적으로 길은 적판을 사용하면 짧은 적판의 경우보다 효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 정확하게 최소압력 지점에서 고저 반전 지점이 나타나는 것과는 달리 최대 압력지점에서 최고온도점이 나타나지 않는 것은 최고압력은 곧 최저 변위를 뜻하기 때문에 일이 발생하지 않는다. 도표에서와 같이 최고 압력인 공명관 내 400mm에서 일이 0이 되는 것을 볼 수 있다. 40mm 적판을 사용하여 관내 430mm지점에서 46.4°C의 온도차를 보이고있다.

Photo.1는 850mm 공명관과 길이 80mm의 mylar적판을 공명관 끝에 설치하고 구동 주파수 179Hz로 150W의 동력을 가하였을 저온부 열교환기에 발생한 서리를 보여주고 있다. cooldown 시간은 3분 20초이며 최저온도는 -7°C이다. 실험조건에서 장치에 단열을 하지 않고 고온부의 열과 작동유체인 공기에 함유되어 있는 습기를 제거하지 않았기 때문에 저온 열교환기에 결로현상이 발생하였다.

5. 결론

1/2파장 열 흡향 냉동기의 구동 주파수, 그리고 공명기 길이와 적판의 길이 및 위치를 변화하여 최적조건을 찾기 위한 실험연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구동 주파수 100Hz~1000Hz 범위 중 1차 하모닉에서는 850mm 공명관을 사용하고 193Hz를 인가하여 46.4°C의 온도차를 얻었다. 2차 하모닉에서는 400mm 공명관을 사용하고

- 827Hz를 인가하여 52.6℃의 온도차를 얻었다.
2. 공명관내 적판에 대해 최고효율을 발생시키는 위치는 1차 하모닉에서는 850mm관내 10mm, 2차 하모닉에서는 400mm관내 200mm 지점이다.
 3. 압력 최대점에서 일이 0이고 압력 최소점에서는 고저온도의 반전이 일어난다.

참 고 문 헌

- (1) Clement. J. R. and Gaffne. J. Y., 1954, "Thermal Oscillations in Low Temperature Apparatus," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol.1, pp. 302
- (2) Yazaki. T., Tominaga. A., and Narahara. Y., 1980, "Experiments on Thermally Driven Acoustic Oscillations of Gaseous Helium," *J. Low Tem. Phy.*, Vol.41, pp.45
- (3) Feltman. K. T., Jr., 1968, "Review of The Literature on Sondhauss Thermo-Acoustic Phenomena," *J. Sound Vib.*, Vol.7, pp.71
- (4) Gifford. W. E and Longworth. R. C., 1966, "Surface Heat Pumping," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol.11, pp.171
- (5) Merkli. P. and Thomann. H., 1975, "Thermoacoustic Effects in a Resonant Tube", *J. Fluid Mech.*, Vol.70, pp.161
- (6) Rott. N., 1969, "Thermoacoustic," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.20, pp.135~175
- (7) Rott. N., 1969, "Damped and Thermally Driven Acoustic Oscillations in Wide and Narrow Tubes," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.20, pp.243
- (8) Rott. N., 1969, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part II Stability Limit for Helium," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.24, pp. 54~72
- (9) Rott. N., 1975, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part III Second-Order Heat Flux," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.26, pp.43~49
- (10) Rott. N., 1976, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part IV Tubes with Variable Cross-section," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.27, pp.197~224
- (11) Rott. N., 1976, "Thermally Driven Acoustic oscillations. Part V Gas- Liquid Oscillations," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.27, pp.325~334
- (12) 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
- (13) Hofler. T. J., 1986, "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance", Ph. D. dissertation at University of California, SanDiego
- (14) Swift G.W., July 1995, "Thermoacoustic Engines and Refrigerators," *Physics Today*, pp.22~28.