

헬륨을 냉매로 사용한 1/2파장 열음향 냉동기의 실험 및 성능평가

최 두 원[†], 김 동 혁*
한국해양대학교 냉동공조공학과

The construction and performance Investigation of 1/2 Wavelength Thermoacoustic Refrigerator with Helium Refrigerant

Doo-Won Choi[†], Dong-Hyuk Kim*

Department of Refrigeration & Air conditioning Engineer, Graduate School of Korea Maritime
University, Busan 606-791, Korea

ABSTRACT: Thermoacoustic refrigerators are operated with acoustic power to pump heat. The acoustic standing wave displaces the gas in the channels of the stack while compressing and expanding. The thermal interaction between the oscillating gas and the surface of the stack generates an acoustic heat pumping. In this study, a thermoacoustic refrigerator is composed of a resonator of 4cm diameter, stack of plates, heat exchangers and cooling part. Length of the hot heat exchangers, the stack of plates and the cold heat exchanger are 9mm, 8mm and 6mm respectively. Using helium as a coolant at frequency of 516Hz, the cold-part temperature of exchanger fell to -19.0°C after 1hours.

Key words: Thermoacoustic(열음향), Stack(적판), Thermal Penetration Depth(열침투 깊이)

기 호 설 명

COP : 성능계수
 c_p : 비열 [$J/kg \cdot ^\circ C$]
 $2l$: 적판두께 [mm]
 \dot{m} : 물의 질량유량 [l/min]
 Q : 부하 혹은 열전달량 [W]
 T : 온도 [$^\circ C$]
 W : 스피커 동력 [W]
 $2y$: 적판 간격 [mm]

그리스 문자

Δ : 차이

하 첨 자

c : 카르노 혹은 저온부
 h : 고온부
 $elec$: 전기히터
 sp : 스피커 음향동력

1. 서 론

열음향 냉동기술은 비교적 최근에 개발된 기술로서 현재 당면하고 있는 환경파괴의 문제점을

[†]Corresponding author

Tel.: +82-51-410-4974; fax: +82-51-410-4790

E-mail address: 21cbank@naver.com

해결할 수 있는 대안으로서 급격히 부상하고 있다. 공명관식 열음향 냉동기에 있어서는 스피커와 같은 음향발생장치를 기존의 압축기 대신 채택하여 기계적인 신뢰도를 향상시킬 수 있고 또한 소음 및 진동을 거의 소멸시킬 수 있어 차세대 냉동기술서 전혀 손색이 없는 기술이다. 열음향(thermoacoustic)에 대한 연구는 비교적 긴 역사를 가지고 있지만 많은 사람들의 주목을 받지 못했다. 1777년에는 Higgins가 커다란 관에서 수소불꽃 실험을 통해 음향진동 현상을 발견하였 Rijke, Sondhauss, Taconis 등이 음향진동과 열음향효과를 분석하였다. Sondhauss tube는 액체 헬륨(4°K) 사용자들에게 Taconis 진동기로 알려져 있는데 극저온 냉동장치에서 가스가 주입된 관이 상온에서 극저온에 접근할 때 매우 큰 진폭을 갖는 Taconis진동 발생에 대하여 정성적인 방법으로 그 현상을 설명하였다. 이후 1954년 클 Clement, Gaffney, 1980년 Yazaki등에 의해 계속 연구되었다. 1966년 Gifford는 관속의 가스에 매우 낮은 주파수와 높은 진폭을 가진 압력진동에 의한 냉동효과를 제시하였으며, 1975년 Merkli 등이 실린더 형상과 공진하는 공명기 내 최대 속도위치에서 냉각효과가 발생하는 것을 실험하고, 공명기내 가스의 압력변화와 유동에 의한 위상차로 온도변화가 발생하여 관속에서 열 펌핑 작용이 일어남을 규명하였다. 1980년대 들어와서 원리가 규명되어 1980년대 중반부터 연구가 시작되었다. 열음향의 역사에서 본격적인 열음향 냉동장치구현은 1982년에 미국의 국립 Los Alamos 연구소의 Wheatley등이 1986년에 Hofler는 중음 스피커를 구동기로 하고 공명기내에 헬륨기체를 10기압으로 채우고 플라스틱 적판과 구리 열교환기를 이용하여 500Hz로 공진시켜 영하 70℃의 저온을 얻어 실용화 가능성을 보였다. 1988년에 Swift는 그때까지의 열음향 냉동이론에 대한 원리를 체계적으로 정리 발표하였다. 이 스위프트의 논문 발표 이후 열음향 냉동기술도 크게 발전하였다. 지금까지의 열음향 냉동기술에 대한 연구는 미국의 주립 Los Alamos 연구소와 미 해군 대학원이 주축이 되어 왔다. 그리고 미국의 펜실베이니아 주립대학교에서도 활발한 연구를 수행 중에 있다. 이처럼 미국은 이 분야에서 많은 연구를 하고 있는데 현재 열음향에 관련된 여러 가지

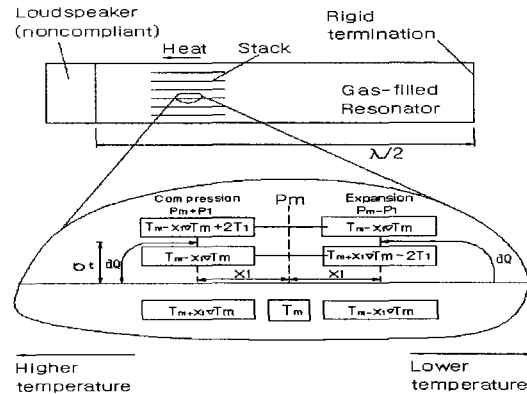


Fig. 1 Heat transfer mechanism.

극저온 냉동기를 개발하고 있다. 최근 선진국에서는 열음향 엔진과 열음향 냉동기를 결합한 자동차용 공기조화장치, 우주선용 냉각기(STAR, 작동주파수 400Hz), 레이더 전파발생장치 냉각용, 소형 냉장고(TALSR, 작동주파수 320Hz)가 실용화되었으며, 대용량, 대규모의 열음향 냉동기의 실용화를 위하여 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 헬륨을 작동 매질로 1/2파장 열음향 냉동기를 제작하여 음향동력, 구동주파수, 공명관내의 적판위치에 따른 냉각력과 그에 따른 최적조건에서 성능계수를 시험하였다.

2. 열음향 냉동 원리

Fig. 1은 열음향 냉동기의 스택 내 기체의 작은 덩어리가 스택을 따라 주기적으로 진동할 때 기체 덩어리를 따라 가면서 기체 덩어리가 거치는 과정을 나타낸 것이다. 음향구동기인 스피커는 헬륨으로 충전된 공명기를 통하여 1/2파장을 여기시키며 적판을 따라 열펌핑 작용을 하게 되는 중요한 역할을 하게 된다. 적판은 일반적으로 수배의 열침투 깊이를 가진 단판들로 구성되어졌고 지폭의 크기에 따라 유사한 온도 분포를 가진다. 열침투 깊이는 기체가 한 사이클 동안 열을 확산시킬 수 있는 거리를 말하며 열교환을 하는 기체층을 열경계층이라 부른다. 그림을 보면 단판 위에서 기체 입자가 진동을 하고 있고 단판으로 열전달 하고 있는 것을 볼 수 있다. 기체속을 진행하는 음파는 단열과정(adiabatic process)을 이행한다. 음파는 종파인 압력파이므로 음파가 진행하는 방향으로 기체 압력이 주기적으로 변화

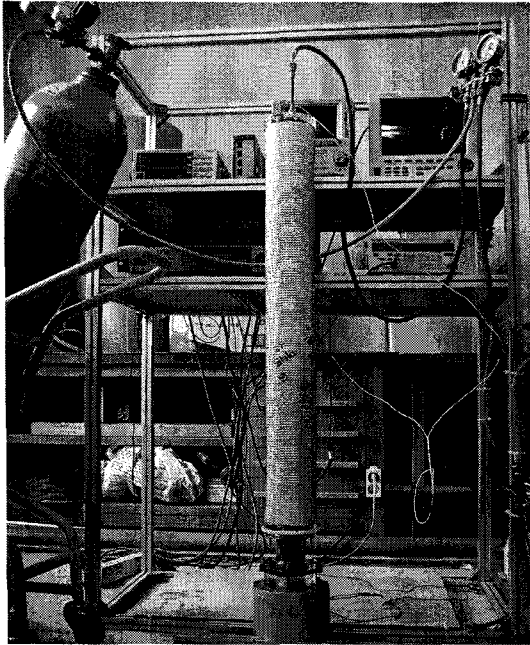


Fig 2. Photograph of 1/2 Wave Thermoacoustic Refrigerator

하게 되며 이에 따라 기체의 단열압축과 단열팽창이 발생하게 된다. 이러한 단열압축 및 팽창은 기체의 온도변화를 동반하게 된다. 기체의 온도 변화는 음압의 크기에 비례하며 이것을 스택에 개재되면 기체와 스택 사이에 일종의 열경계층이 존재하게 된다. 이 열경계층에서 기체의 입자 당 어리가 좌우 진동하면서 한 사이클을 행하는 동안 열량은 우측에서 좌측으로 이동하게 된다. 즉 온도구배를 거슬러 전달되는 열펌핑 역할이 수행되며, 이러한 기체의 입자들이 스택을 따라 연속되어 있다고 생각하면 열량은 온도구배를 거슬러 인접된 기체 입자로 계속 전달된다. 이렇게 기체 입자들은 서로 열교환과 열전달을 하면서 고온 열교환기에 열을 방출하고 저온 열교환기에서 열을 흡수한다. 이 사이클은 두 개의 가역단열과정과 비가역 정압과정으로써, 브레이튼 사이클과 동일하다. 1/2파장의 열음향 냉동기에 대한 압력은 공명관에서 양단의 압력이 antinode이고, 중앙이 속도의 antinode이다.

3. 실험장치 및 성능 계산식

3.1 실험장치

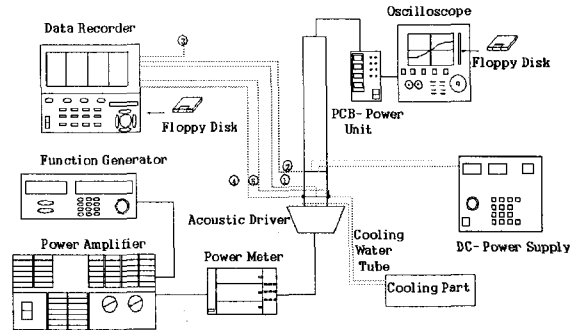


Fig. 3 Experimental apparatus.

Fig. 2는 실험을 바탕으로 설계된 열음향 냉동기에 냉매를 헬륨을 사용한 장치의 냉동효과를 실험하기 위한 장치사진이며, Fig. 3은 측정장치의 개략도이다. 외경 150mm, 깊이 155mm의 SUS재질인 스피커 하우징은 스피커를 고정하면서 기체의 압력을 유지시키는 역할을 하고 있다. 공명관은 내경40mm, 두께 10mm, 길이 910mm의 아크릴관을 사용하였고, 고온열교환기와 저온 열교환기는 구리재질로 38mm 내경은 Fin 두께 0.3mm, Fin 간격 0.6mm로 와이어컷팅법으로 정밀가공하였다. 제작에 있어서 중요한 사항이라 할 수 있는 Stack(박판집적체) 제작이라 할 수 있다. Stack은 0.15mm의 얇은 Kapton재질의 80mm 평판에 0.5mm의 낚시줄을 5~7mm 간격으로 접착 후, 말아서 사용하였다. Stack의 양쪽 끝에는 열교환기가 축 방향과 동일한 방향으로 배치되어 있었고, Stack과 열교환기의 근접거리는 0.1mm이하가 되게 하여야 한다. 그리고, 저온 열교환기에 냉동부하를 주어서 성적계수를 측정하기 위해 외경 0.53mm, 저항 0.373Ω/m인 테프론 절연전선을 60cm를 감았다. 저온열교환기 주위에 유리섬유를 감고, 열전도가 낮으며 고온에

Table 1 Dimension of thermoacoustic refrigerator

Component	Length (mm)	Radius (mm)	박판간격 (mm)	Fin 간격(mm)
Resonator	910	36		
Hot heat exchanger	9	36	0.6	0.3
Cold heat exchanger	6	36	0.6	0.3
Stack	8	36	0.5	0.15

잘 견디고 열전도도가 낮은 재료의 플라스틱인 MC를 사용하였다. 모든 부품은 음압손실을 최대한 줄이기 위해 오링과 실링을 이용하여 볼트로 체결하였다. 음향 동력원인 스피커의 발열로 인한 보이스 코일이 타는 것을 막기 위하여 페라플레이트 용액을 스피커 자석GAP에 투입하였고, 스피커 하우징에 변압기 오일을 채워 넣어 스피커에서 발생하는 열을 방출시켰다. Table 1은 열음향 냉동기의 부품들 치수를 정리해 놓은 것이다.

3.2 성능 계산식

냉동기의 성능은 저온 열교환기에서 열전달된 열량과 열전달에 사용된 음향동력으로 정의되며, 냉동부하는 저온 열교환기에 위치한 전기 열선에 의해 공급되어진다. 따라서 냉동기의 COP는 다음과 같다.

$$COP = \frac{Q_{elec}}{W} \quad (1)$$

모든 냉동기의 최대효율을 나타내는 COP_c는 다음과 같다.

$$COP_c = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (2)$$

열음향 냉동시스템을 에너지 보존법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$Q_h = W_{sp} + Q_{elec} \quad (3)$$

여기서 Q_h 는 고온 열교환기로 열전달된 열량이므로 다음과 같이 표현된다.

$$Q_h = \dot{m} C_p \Delta T_w \quad (4)$$

4. 실험방법 및 결과고찰

열음향 냉동기에 필요한 음압의 발생은 함수 발생기(Yokogawa FG110)로 정현파를 발생시켜 증폭기(Fidek, FPA-G12)를 통해 스피커 구동시

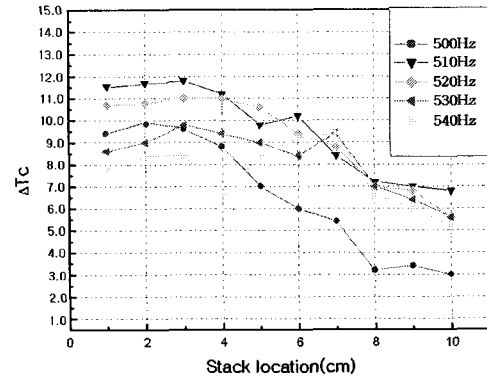


Fig. 4 Temperature profile of Cold side(10W)

켰다. 본실험에 앞서 10W동력으로 주파수 200Hz에서 300Hz까지 10Hz 간격마다 Stack의 위치에 따른 온도변화 추이를 관찰하는 Sweeping작업을 하였다. 음압레벨측정은 음원 구동부에서 620mm 지점에서 마이크로폰(Piezotronics, Model 103A02)을 설치하여 신호조절기(PCB, Model 482A16)로 연결되어 디지털 오실로스코프(DL1620)로 보내서 끝 지점의 음압을 측정하였다. Fig. 2에서 온도 측정점은 고온 열교환기내부(point①), 저온열교환기(point②), 실내온도(point③), 냉각수 입.출구로 5지점으로 하였다. 측정점은 드릴로 $\Phi 2\text{mm}$ 정도의 구멍을 만들어 그 내부로 열전대(Omega, K-type)를 설치한 뒤 데이터 기록기(Yokogawa, MV200 MobilCorder)를 통해서 데이터를 저장하였다.

Fig. 4는 작동 매질이 헬륨인 공명관 길이가 910cm인 열음향 냉동기를 5분 동안 구동하여 스택의 위치에 따른 주파수별 온도변화이다. 실험결과 주파수 510Hz에서 11.9°C로 온도감소폭이 가장 컸으며, Stack이 스피커에서 3cm 떨어진 위치에서 온도감소폭이 크게 나왔다.

Fig. 5는 냉동기에 가압 실험을 한 도표이다. 열음향 냉동기에서 헬륨에 가압하는 목적은 공명관 내에 경계층 마찰 손실을 줄이는데 있다. 그러나 적판 표면의 열유속도의 크기도 작아지기 때문에 최적 효율의 압력을 실험으로 찾아야 한다. 20W스피커동력을 사용하였고, 500Hz, 510Hz, 520Hz를 인가했을때, 510Hz 인가시 1kgf/cm^2 의 압력에서는 -1.8°C 를, 2kgf/cm^2 의 압력에서는 -6.1°C 를, 4kgf/cm^2 의 압력에서는 -7.3°C 의

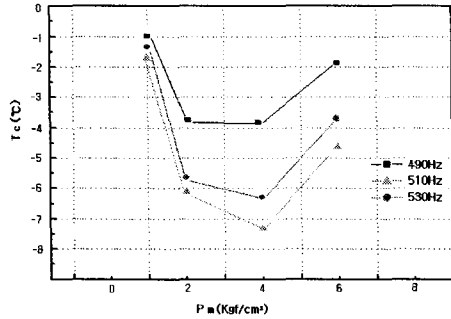


Fig. 5 Temperature ratio and operating frequency versus mean pressure of refrigerator

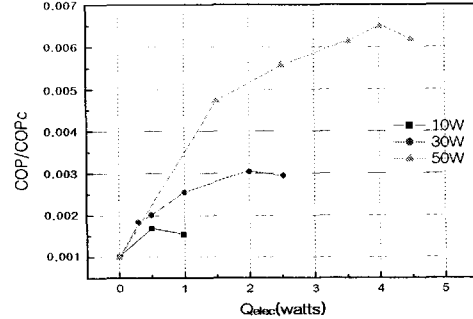


Fig. 8 Coefficient of performance relative to Carnot's coefficient of performance according to the electric heater power.

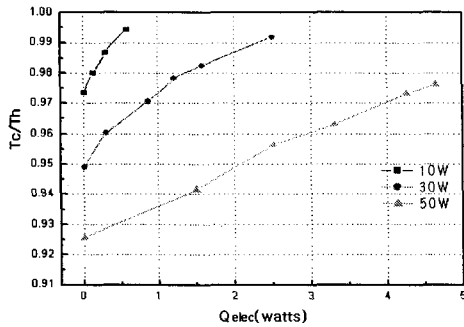


Fig. 6 Temperature ratio according to the electric heater power.

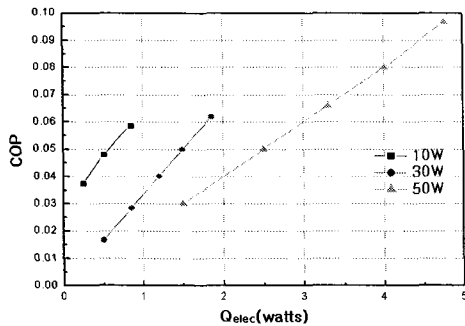


Fig. 7 Coefficient of performance according to the electric heater power

최저 도달온도를 기록하여 모든 실험에서는 헬륨 $4kgf/cm^2$ 의 압력을 사용하였다

Fig. 6은 Fig. 4의 데이터를 근거로 하여 실제 열음향 냉동기를 제작하여 냉동부하와 함께 스피커 동력을 10W 30W 50W 인가시켜, 나타낸 온도비율 그래프이다. COP 측정은 먼저 열음향 냉동기를 각각의 스피커 동력으로 인가하면, 저온

열교환기는 냉각 후 얼마 정도의 시간이 흐른 뒤 정상상태에 도달한다. 그때 저온 열교환기에 감겨 있는 열선에 전력을 인가함으로써 냉동부하를 공급하게 된다. 일정 시간 후 정상상태의 온도에 도달 할 때 산출된 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7은 COP는 스피커 동력과 함께 냉동부하에 따라 증가하고, COP의 기울기(Slope)는 스피커 동력이 증가함에 따라 감소한다. 여기에서 알 수 있는 것처럼 COP 특성은 스피커 동력의 함수이고, 저온부의 냉동능력(Cooling power)도 스피커 동력에 따라 크게 변화하는 것을 알 수가 있다. 최대효율을 나타내는 카르노 COP_c 와 대비시킨 냉동기의 COP를 나타내보면 Fig. 8과 같다. COP/COP_c 는 스피커 동력에 따라 포물선 모양에 가까운 특성을 나타내지만, 스피커 동력에 따른 COP/COP_c 비와 최대값은 변하게 된다. 스피커 동력 50W에서 약 0.65%로 가장 큰 COP를 보여주고 있다.

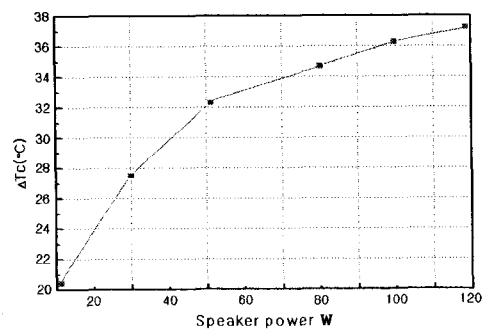


Fig. 9 The cold side temperature profiles according to speaker power.

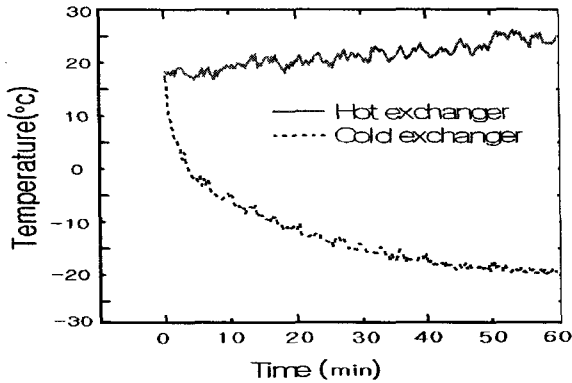


Fig. 10 Temperature profile of the Hot side and Cold side according to time with power(120W)

Fig. 9는 스피커 동력 120W에서 저온부에 냉동부하를 주지 않고 스피커동력에 따른 저온부 온도차를 나타낸 것이다. 스피커 동력에 따라 온도차는 커지는 반면에 온도차의 기울기(Slope)는 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에서는 스피커 동력 120W시 고온부와 저온부에서의 온도이력을 나타낸 것이다. 공명관 길이는 910mm, 작동 주파수는 516Hz로 동작하였고, 1시간 후 -19.4°C 를 보이고 있다. 1시간이 지나면서부터는 온도 떨어짐이 둔화되기 시작하였고, 스피커동력으로 인한 스피커의 발열이 스피커 하우징을 타고 열교환기로 열전도 되는 것이 원인으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 열음향 원리를 이용하여 헬륨을 이용한 1/2파장 열음향 냉동기를 제작하여 주파수 별, 압력 별, 음향 출력에 대한 온도 특성을 조사하였다. 최적의 조건을 찾기 위해서 스택의 위치, 주파수 별로 실험 연구를 수행했고, 그 최적의 조건에서 열음향 냉동기의 성능평가를 수행하여 다음과 결론을 얻었다.

(1) 910mm 공명관 내에 헬륨 $4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 압력에서 주파수는 516Hz가 최적 냉동주파수이고, 스택이 스피커로부터 3cm 거리에서 가장 큰 온도 차이를 보였다.

(2) 열음향 원리를 실제 적용하여 열음향 냉동기를 설계 제작하여 구동시켜본 결과 스피커 동력 120W 인가 시 -19.4°C 까지 냉각시킬 수 있었

다.

(3) 냉동부하를 증가시키면서 정상상태 도달 온도를 측정한 결과 온도비는 냉동부하가 증가함에 따라 증가하며, 스피커 동력이 증가함에 따라 냉동능력도 증가 하였다. 또한 스피커 동력 50W에서 약 0.65%로 가장 큰 COP/COPc 를 보여준다.

(4) 실험결과 냉동기의 효율이 작았음에도 불구하고, $\Delta T = 37.4^{\circ}\text{C}$ 의 온도감소를 나타내었다. 효율이 떨어지는 전기에너지를 이용한 음향에너지를 얻는 방식(스피커구동방식)보다, 열에너지를 이용한 열구동 방식의 음향발생장치를 설계제작하여 효율을 개선시킨다면 실제 냉동기를 대체할 만한 냉동기로 발전할 수 있을 것으로 보인다.

참고 문헌

- Higgin, B., 1802, Nicholuson's J., vol.4, p.130
- Rijke, P.L., 1859, "Notiz über eine neue Art, die in einer an beiden Eden offenen Röher enthalten Luft in Schwingungen zu versetzen", Ann. Phys.(Leipzig), vol.107, p.339
- Sondhauss, C., 1850, "über die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Claströhren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite", Ann. Phys.(Leipzig), vol.79, p.1
- Lord Rayleigh, 1945, The theory of sound, 2nd ed., vol.2, sec.322
- Taconis, K.W., 1949, "Vapor-liquid equilibrium of solutions of ^3He in ^4He ", Physica, vol.15, p.738
- Gifford, W.E and Longthworth, R.C., 1966, "Surface Heat Pumping", Adv. Cryog. Eng., Vol. 11, p.171
- Wheatley, J., Hofler, T., Swift, G. W., and Migliori, A., 1983, "An Intrinsically Irreversible Thermoacoustic Heat Engine", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74 No. 1, p.153
- Hofler, T.J., 1986, "Thermoacoustic Refrigerator Design and Performance", Ph. D. Thesis, University of California, San Diego
- Swift, G.W., 1988, "Thermoacoustic engines", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 8, No. 4, pp.1145-1180