

# 1/4파장 열음향 냉동기의 공명관 길이 의존 특성 연구

송 규조\* · 박 종호\*\* · 고 득용\*\*\* · 박 성제\*\*\*

## An Experimental Study that depend on the Resonance Tube Length for a Thermoacoustic Refrigerator of 1/4 wave

Song Kyu Joe , Park Jong Ho , Koh Deuk Yong , Park Seong Je

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

### 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 length of the resonance tube to 400mm,500mm,600mm,700mm. In order to determine the optimum resonance tube length and the frequency, the  $\lambda/4$  thermoacoustic engine and the similar apparatus of Wheatly type refrigerator were constructed. It was used air as a coolant. in the fifth harmonic, it was taken the highest  $\Delta t$  that was 56.3 °C at 626Hz in 400mm tube with 40mm stack.

### 기호설명

$\delta_x$  : 열 침투깊이  
 $\mu$  : 동점도  
 $\rho$  : 밀도  
 $f$  : 주파수  
 $f_n$  : 공명 주파수  
 $S$  : 관 단면적  
 $L$  : 관 길이  
 $Z$  : 임피던스  
 $P$  : 음압  
 $c_p$  : 단위 질량당 등압 열용량

$A$  : 적판 단면적  
 $\delta_v$  : 점성침투깊이  
 $P_{osc}$  : 진동압력  
 $P_{avg}$  : 평균압력  
 $c$  : 음속  
 $\rho_0$  : 체적 밀도  
 $\sigma$  : Prandtl 수  
 $k$  : 전파상수  
 $u$  : 입자 속도  
 $a$  : 관 반경

### 1. 서론

열음향 냉동은 증기 압축식 냉동기에 비해 큰 동력을 필요로 하지 않는 저온 냉동기술 중 하나

\* 회원 충남대학교 대학원

\*\* 회원 충남대학교 기계공학과

\*\*\* 한국 기계연구원

로 스피커와 같은 음향 발생장치가 기존 냉동기의 압축기로 대체되어 있으며 CFC를 냉매로 사용하는 대신에 헬륨, 아르곤 등 환경에 무해한 기체를 사용하고, 구조가 비교적 간단하여 유지보수가 쉬워 기계적 신뢰도가 높은 것이 특징이다. 스피커의 진동부분을 제외하면 가동부가 없고 구조가 단순하기 때문에 저가적으로 제작할 수 있다. 그러나 저효율이 문제가 되고있어 그것을 보완하기 위한 연구가 계속 진행되고있다. 무한매질 안에서 소리가 전파되는 경우 열은 소리의 전파 방향을 따라 매질을 통하여 확산되며 관 안에서 소리가 전파되는 경우 열은 매질을 통해 관 안에서 확산된다. 균일온도로 관내 발생한 정재파에 대해 관벽을 따라서 순열(net heat)의 이동이 있으며 Merkli 와 Thomson<sup>(1)</sup>에 의하여 관내 정재파 속도배 영역에서 압력 배 영역으로 열이 전달된다는 것이 발견되었다. 이 현상은 Rott<sup>(2-7)</sup>에 의해 열음향학적 흐름(thermoacoustic streaming: 열음향 냉동)이라고 명명되었다. 그 반대의 경우로 관내에서 음파를 발생시키려면 상당한 온도구배가 관에 주어지게 되는데 그것을 최초로 설명하고자한 사람이 1850년 Sondhauss<sup>(8)</sup>였다. Taconis<sup>(9)</sup> 진동이라고 알려진 이 효과는 관이 극저온 용기에 삽입되거나 그 반대인 경우로, 용용된 유리관을 유리병에 접합할 때 볼 수 있다. 이 현상은 1969년 Rott가 이론적으로 설명하였으며 이 열음향 음향 발생과 열음향 냉동을 같이 고려하여 열음향 효과라고 말한다. 음향 냉동기의 예로 남아프리카의 Concil for Scientific and Industrial Research 에서 제작한 반파장 구동용 twin speaker U형 냉동기가 있는데 공명관은 유리섬유이고 cooling power 100w 이다. 실험용냉동기로는 Bimorph piezoelectric을 구동기로 쓰는 소형 냉동기가 있는데 적판재질은 cotton wool이며 4.2KHz에서 약30° K의 온도차를 나타낸다. STAR (space thermoacoustic refrigerator)라고 명명된 1/4파장용 냉동기는 매질로 He & Argon 혹은 He & Xenon의 혼합기체를 사용하는데 평균압력은 10atm이다. polyester film의 재질인 길이, 79mm, 직경 38mm의 적판을 사용하여 100-200° K의 온도차를 보인다.

국내에서도 열음향 냉동기 개발 시도는 있지만 미약한 수준이다. 따라서 실제로 냉동이 가능한 냉동기를 제작하기 위해 본 논문에서는 열 음

향 냉동기의 성능을 좌우하는 최적 구동 주파수와 공명관의 길이에 대한 상관관계를 찾으려 열음향 냉동기를 변형한 장치를 제작하고 구동주파수를 100Hz에서 1000Hz까지 변화시키면서 공명관 내 생성되는 n차 하모닉에 따른 온도거동과 공명관의 길이가 변했을 때 공명관 내 적판위치에 따른 온도변화와 압력변화들을 고찰하였다.

## 2. 열음향 냉동기 특성

열음향냉동기는 Fig.1에 보인 바와 같이 정재파를 만들어 주는 스피커,  $\lambda/4$ 의 정재파를 유도시키는 공명관, 공명관에 개방조건을 만들어주는 Helmholtz 공명구, 공명관내에 온도차를 발생시키는 적판, 그리고 열을 방출하고 흡수하는 고·저온 열 교환기로 구성된다. 열음향 냉동기의 작동원리는 공명관 내 적판을 따라서 음압을 매개로 하여 기체가 진동할 때 단열압축과 팽창을 되풀이 하면서 온도차를 발생시키는 것이다. 적판은 두 개의 열 교환기 사이에 위치하며 온도구배를 형성시켜 열을 펌핑하는 중요한 역할을 한다. 열음향 냉동기 성능에 영향을 미치는 중요한 인자는 적판 사이 간격이며  $1/(\pi f)$  동안 작동 유체 내에 열이 확산되는 거리를 나타내는 열침투깊이( $\delta_x$ )의 4배정도로 하면 최대 효율을 얻을 수 있으며, 유체유동에서 Prandtl수  $\sigma (= \mu c_p / \kappa = \delta_\mu^2 / \delta_x^2)$ 는 점성의 함수이기 때문

에 낮으면 열 음향 측면에서는 더 높은 효율을 기대할 수 있다.

압력 배는 스피커 부근에 위치하고 압력 마디는 Helmholtz공명기 개구부 부근에 위치하고 있으며 일반적으로 열 음향 구동장치의 공명관내 진동압력은 평균압력의 3~10%정도이다. 공명관

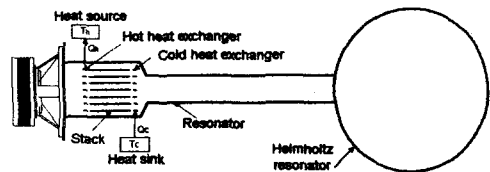


Fig. 1 Schematic diagram of  $\lambda/4$  wavelength thermoacoustic refrigerator.

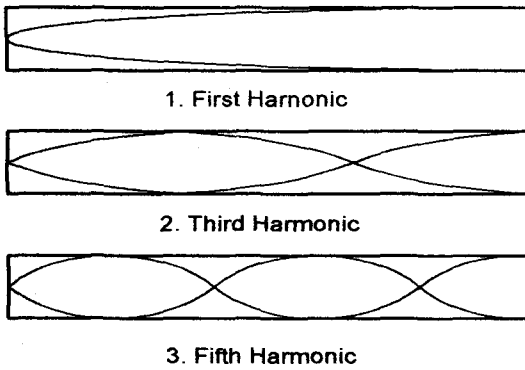


Fig. 2 Open Tube.  $n \frac{\lambda}{4}, n=1, 3, 5.$

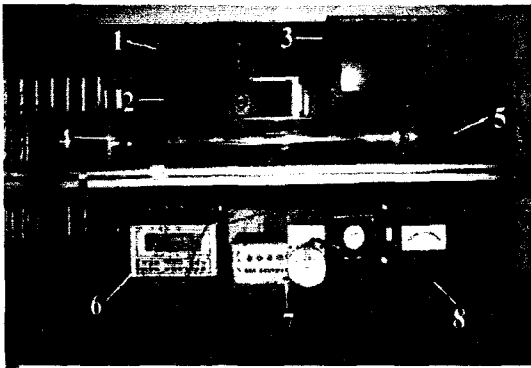


Photo.1 Photograph of experimental apparatus

- |                             |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| 1. Data Acquisition System. | 2. Amplifier       |
| 3. Oscilloscope             | 4. Resonator       |
| 5. Horn Driver              | 6. Power Analyzer  |
| 7. Function Generator       | 8. Micro Manometer |

내 작동유체는 공기, 헬륨 또는 아르곤가스를 사용하고 헬륨가스는 분자량이 작아 빠른 음속을 가지며 열전도가 커서 가압하면 Power density를 증가시킬 뿐만 아니라 냉동기의 단위 부피 당 동력을 증가시켜서 유리하다. 열음향냉동기의 power는 대략  $P_{avg}Ac(P_{osc}/P_{avg})^2$ 으로 나타낼 수 있다. 열음향 장치에서 가장 중요한 변수들인 기체의 음속과 공명기의 길이는 열음향 냉동기의 구동주파수를 결정한다. 기존에 실험 제작된 열음향 냉동기의 공명관의 길이는 10cm에서 10m 정도이며 이 공명관 내에서 1/4파장과 1/2파장의 정재파를 구현시킨다. 공명관 내 발생하는 주파수를 살펴보면 다음과 같다. 관 초입인  $x=0$ 에서

스피커가 구동되고 기계적 임피던스  $Z_{mL}$ 에서 관이 끝난다( $x=L$ )고 생각한다. 그리고 스피커는 평면파로 전파되면서 저주파로 하모닉을 이루면서 진동한다면

한쪽 관이 개방되어있을 때

$$Z_{mL} = 0 \text{이고}$$

$$\frac{Z_{m0}}{\rho_0 c S} = j \tan \kappa L$$

개방관 공명주파수는  $f_n = \frac{nc}{2L}, n=1, 2, \dots$

실험한 냉동기는 완전한 개방관이 아닌 개방조건을 모사하고 있으므로 플랜지를 가진 관으로 공명주파수를 수정하면 다음과 같다.

$$\frac{Z_{mL}}{\rho_0 c S} = \frac{1}{2} (\kappa a)^2 + j \frac{8}{3\pi} \kappa a$$

$$f_n = \frac{n}{2} \frac{c}{L + \frac{8}{3\pi} a} \quad n=1, 2, \dots$$

----- ①

### 3. 실험장치 및 방법

열 음향 냉동기의 성능을 좌우하는 최적 구동주파수와 공명기의 길이 및 적판의 길이 그리고 공명관 내 적판 위치에 대한 냉동효과를 실험하기 위하여 Photo.1에 보인바와 같이 Wheathy형 냉동기와 유사한 열음향 발생장치를 제작하고 측정장치를 설치하였다. 냉동기 작동유체는 공기이며 작동하지 않았을 때 냉동기 내 평균압력은 대기압이다. 음향 동력원은 고성능 확성기에 사용되는 Horn driver(SU-150EF 150watt)를 사용하였고, 공명기는 열전도가 낮은, 길이 700mm, 600mm, 500mm 400mm, 내경 40mm, 외경 50mm 크기의 아크릴 관으로 제작하였으며 적판의 순수온도차를 보기 위하여 별도의 단열은 하지 않았다. Helmholtz 공명기 역할을 모사하는 자체제작 공명통은 내경 99mm 길이 140mm의 폴리 염화비닐 관으로 제작하였고, 하부는 두께 15mm인 아크릴 판으로 되어있으며 그곳에 적판을 이동하게 할 수 있는 rod와 공명기 내부의 진동압력을 측정하기 위한 압력공을 내었다. 본 실험에 사용된 적

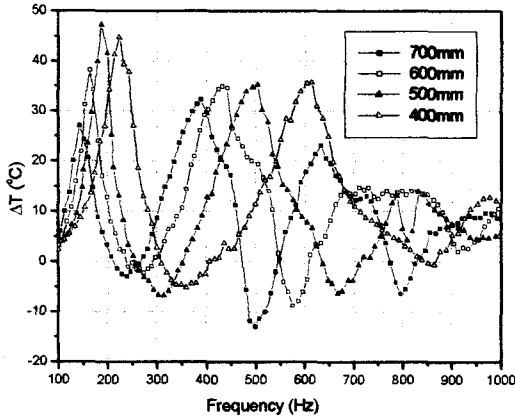


Fig. 3  $\Delta T$  profiles with the frequency sweeping and the resonator length.(1st harmonic)

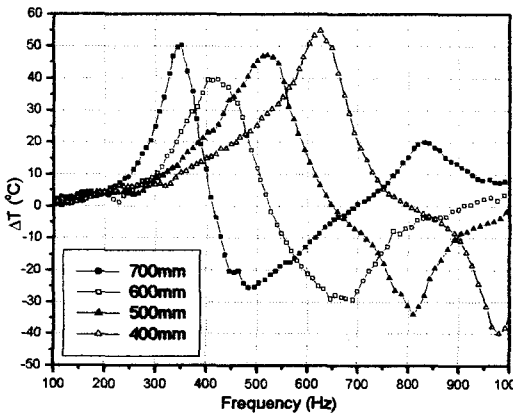


Fig. 4  $\Delta T$  profiles with the frequency sweeping and the resonator length. (3rd harmonic)

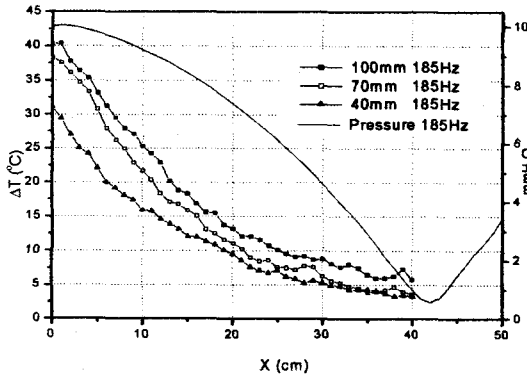


Fig.5  $\Delta T$  profiles & pressure profile with resonator length according to X axis. (1st Harmonic, 500mm Tube )

관의 형상은 제작의 용이성과 비용절감을 위해 평판을 배제하고 두루말이 형태로 제작하였다. 적판은 0.06mm 두께의 Kapton film에 직경 0.37mm 남시 줄을 3~6mm 간격으로 접착한 뒤 이것을 말아서 직경이 40mm가 되도록 제작하였고 실험을 위하여 길이 100mm, 70mm, 40mm의 적판 3개를 준비하여 사용하였다.

열을 흡수하여 방출하기 위한 저·고온 열 교환기는 적판에서 직접 열전대로 온도변화를 측정하였기 때문에 본 실험에서는 설치하지 않았다. 적판 및 저·고온부에서의 온도측정은 K형 열전대를 측정위치에 설치하고 정상 온도에 도달하는 3분의 간격을 준 뒤 Data logger( Fluke HYDRA 26353)를 통하여 컴퓨터로 데이터를 수집하였다.

냉동기에 공급한 구동 주파수는 함수발생기(F-8002, Gold Star)를 사용하여 정현파 신호를 발생시킨 뒤 증폭기(Inkel MA430)를 거쳐 스피커를 구동시켰다. 스피커에 공급되는 동력은 전력량계(Voltec PM300)로 측정하였다. 공진기 내부에 발생하는 압력변화는 적판 sliding rod 부분을 떼어낸 뒤 별도의 피토판을 사용하여 미소압력계(Furness Control MDC FC001)로 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

개방관에서 주파수의 변화에 따라서 음파는 마디와 배를 형성하는데 그 실체는 압력이 밀한부분과 소한부분이다. 공명기에서 주파수 증가에 따른 정재파형은 Fig.2과 같이 나타난다. 구동 주파수를 10Hz 간격으로 100Hz에서 1000Hz까지 변화시킬 때 각각의 공명관(700mm, 600mm, 500mm, 400mm)에서 주파수 증가에 따른 온도 분포는 Fig.3과 같이 나타난다. 100mm길이의 적판을 사용하였고 구동음향동력을  $10 \pm 0.1W$ 로 조정하면서 측정하여 입력 구동음향동력에 따른 온도차 변화를 고찰하였다. 1차 하모닉 근방에서 생성되는 주파수 대역은 100Hz에서 300Hz이며 관의 길이가 짧을수록 주파수대가 상승하고 있음을 알 수 있다. 3차 하모닉이 생성되는 주파수 대역은 300Hz에서 700Hz이다. 공명관의 길이가 짧을수록 온도차가 크게 나타나는 경향을 보이거나 최고온도차는 400mm공명관에서 보다 500mm공명관에서  $48^{\circ}C$ 의 최고 온도차가 발생하며 구

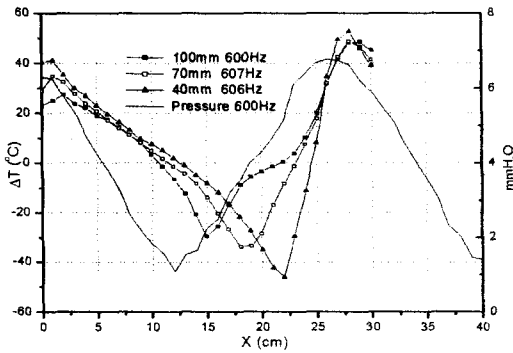


Fig. 6  $\Delta T$  profiles & pressure profile with resonator length according to X axis. (3rd Harmonic, 400mm Tube)

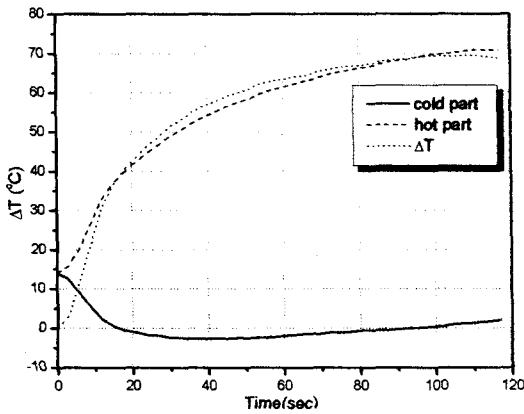


Fig.7 Temperature profiles at hot and cold part according to time.

동주파수는 약 180Hz인 것을 알 수 있다. 1차 하모닉에서 공명관의 길이에 따라 27°C에서 48°C도까지 온도차 변화를 보이고 있어 주파수와 공명관의 길이에 따르는 온도차는 서로 밀접한 함수관계가 있음을 알 수 있다.

Fig.4는 각 공명관들에 대해 3차 하모닉 대 주파수에서 최대 온도차를 보이는 공명관 내 위치에 적판을 고정하고 100Hz에서 1000Hz까지 10Hz씩 주파수를 변환시키면서 온도차를 측정 도시한 것이다. 3차 하모닉 부근에서는 단위  $\frac{1}{4}$  파장이 1차 하모닉에서 보다 짧고 그에 따라 40mm 적판에서 100mm 적판 보다 큰 온도차를 보이기 때문에 3차 하모닉의 최대 온도차를 보기 위해서

40mm 적판으로 교환했다. 700mm 공명관의 경우 410Hz부근에서 역전 온도점이 나타나며 이후 700Hz에서 다시 역전 온도점이 나타나기까지 고온부와 저온부가 역전되는 현상이 일어난다. 역전온도점은 음압 마디 부분에 해당되는 부분으로 압력은 최소가 되고 기체입자의 속도는 최대가 되며 서로 couple이 된 압력과 속도가 적분이 된 일이 발생하지 않는 열흐름이 0인 부분에 해당한다. 700mm에서 400mm 공명관까지 역전온도점은 약 100Hz의 간격으로 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 공명관의 길이 축소와 더불어서 최대 온도 역시 반비례적으로 상승하는데 400mm 공명관에서 626.4Hz에서 최고온도 55°C를 보이고 있다.

Fig.5는 500mm 공명관내의 압력 상태와 100mm, 70mm, 40mm 적판들의 온도차를 나타내고 있다. 압력은 미소압력계( Furness Control MDC FC001)를 사용하여 Pitot tube로 측정하였고 측정된 최대 압력진폭은 10mmH<sub>2</sub>O이며 공명관 내 42cm 되는 지점에서 최소의 압력을 나타내고 있다. 이 압력 profile은 예상하지 못한 결과였으나 최적효율 주파수와 관 자체의 공명주파수가 일치하지 않는 이유를 보여주고 있다. 관의 끝에서 최소 압력으로 되지 않고 상부로 최소 압력지점이 이동한 것은 공명통이 개방관의 역할을 제대로 못하고 급확대관의 역할을 하기 때문이다. 최소압력점은 점차 고온부와 저온부의 위치가 역전되어지는 기준점이 된다. 100mm 적판이 40mm 적판보다 약 10°C 정도 높은 온도차를 보이고 있다는 것을 알 수 있으므로 단위 파장 내에서 최대온도차는 적판의 길이가 짧을수록 불리하다.

Fig.6은 3차하모닉으로 400mm 공명관 내의 압력 상태와 100mm, 70mm, 40mm 적판들의 온도차를 나타내고 있다. Pitot tube로 측정된 최대압력진폭은 6.8mmH<sub>2</sub>O이며 공명관 내 120mm 지점과 관 끝인 400mm 되는 지점에서 최소의 압력을 나타내고 있다. 3차이상의 하모닉에서는  $\frac{1}{4}$  λ의 단위길이가 짧아지기 때문에 상대적으로 길은 적판을 사용하면 짧은 적판의 경우보다 효율이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 고·저 반전부 즉 공명관 내 적판 위치 120mm에서는 압력이 최소이기 때문에 열흐름이 0이고 공명관내 적판위치 10mm

와 260mm에서는 압력이 최대인 지점이 되고 압력배보다 약간 떨어진 위치에서 최대 온도차가 발생하고 있고 압력 배는 기체속도 마디이기도 하기 때문에 그 위치에서는 일이 0이라는 것을 보여주고 있다. 적판의 길이에 대해 온도구배가 0인 점들의 위치가 각각 다른 것을 알 수 있는데 100mm 적판의 경우 역전온도점의 위치가 스피커 쪽으로 접근하고 있으며 온도차 곡선 또한 많이 변형되어 있다. 그것은 길은 적판이  $\frac{3}{4}$  파장에 대해 효율적으로 일을 수행하지 못하고 있음을 나타내며 짧은 적판에 비해 적판 내에서 정과 부의 일이 더 많이 혼재하고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 7는 길이 100mm의 적판을 공명관 끝에 설치하고 구동 주파수 185Hz로 100W의 동력을 가하였을 때 시간에 따른 저·고온부의 온도이력을 도시한 것으로 약 30초후에 최저 온도차를 나타내었다. 2분후 약 70°C의 온도차를 보이나 실험 조건에서 장치에 단열을 하지 않고 고온부의 열과 작동유체인 공기에 함유되어 있는 습기를 제거하지 않았기 때문에 적판의 저온부에 결로현상으로 유동을 방해하고 구동 스피커의 보이스코일의 주울 열이 증가하면서 저온부의 온도가 상승하는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

1/4파장 열 음향 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 500mm 공명관을 사용하고 185Hz를 인가하여 48°C의 온도차를 얻었다. 3차 하모닉에서는 400mm 공명관을 사용하고 626Hz를 인가하여 55°C의 온도차를 얻었다.
2. 공명관내 적판에 대해 최고효율을 발생시키는 위치는 1차 하모닉에서는 500mm관내 30mm, 3차 하모닉에서는 400mm관내 280mm이다.

3. 공명주파수와 냉동주파수가 일치하지 않는 이유는 공명통이 개방조건 역할을 제대로 못하고 있기 때문이고 그것으로 인하여 1차 하모닉에서 최소압력지점이 flange 끝으로 가지 않는다.
4. 압력마디에서 역전온도점이 위치하고 압력배에서 약간 편향된 지점에서 최고효율이 발생한다.

## 참 고 문 헌

- (1) Merkli. P. and Thomann. H., 1975, "Thermoacoustic Effects in a Resonant Tube", *J. Fluid Mech.*, Vol.70, pp.161
- (2) Rott. N., 1969, "Thermoacoustic," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.20, pp.135~175
- (3) Rott. N., 1969, "Damped and Thermally Driven Acoustic Oscillations in Wide and Narrow Tubes," *Z. Angrew. Math. Phys.*, (2) Clement. J. R. and Gaffne. J. Y., 1954, "Thermal Oscillations in Low Temperature Apparatus," *Adv. Cryog. Eng.*, Vol.1, pp. 302
- (4) Rott. N., 1969, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part II Stability Limit for Helium," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.24, pp. 54~72
- (5) Rott. N., 1975, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part III Second-Order Heat Flux," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.26, pp.43~49
- (6) Rott. N., 1976, "Thermally Driven Acoustic Oscillations. Part IV Tubes with Variable Cross-section," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.27, pp.197~224
- (7) Rott. N., 1976, "Thermally Driven Acoustic oscillations. Part V Gas- Liquid Oscillations," *Z. Angrew. Math. Phys.*, Vol.27, pp.325~334
- (8) Sondhauss, C., 1850, "Ueber die Schallschwingungen der Luft in erhitzten Glasrohren und in gedeckten Pfeifen von ungleicher Weite" *Ann. Phys. (Leipzig)*, vol. 79, pp. 1
- (9) Tacos, K. W., 1949, "Vapor-liquid equilibrium of solutions of  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$ ", *Physica*, vol. 15, pp. 738