

# 열원에 의해 구동되는 열음향 발생기에 관한 연구

宋 永 秀<sup>1)</sup> , 金 東 赫<sup>2)</sup>

## A Study on the Thermoacoustic Generator Driven by a Heat Source

Song Young-Soo , Kim Dong-Hyuk

### Abstract

There are two types of thermoacoustic refrigeration mode. One is a heat-driven acoustic refrigerator and the other is an acoustic-driven refrigerator by a loud speaker. The heat-driven thermoacoustic refrigeration is selected for this study and this technique needs sound generation by heat source and refrigeration by the generated sound. Of these two, development of sound generation technique by heat source is the objective in this study. When steep temperature gradient exists in the stack of plates, thermoacoustic generator produces sound.

To perform the objective, two different sizes of thermoacoustic generator are designed and constructed. One has dimensions for producing 500Hz of acoustic frequency, while the other produces 250Hz. The latter has larger diameter than the former.

The generators are carefully constructed to produce desired sound quality. Several experiments are carried out to obtain reliable results. In the smaller thermoacoustic generator, the sound pressure level at 1 m away from the tube end is observed to be about 110dB. But the larger generator produces about 95dB for the same condition. In both cases,  $\pm 5$ dB deviations are found. The deviation seems to be due to the condition of experiments; the variety for the position of experiment.

The sound pressure levels and temperature range to maintain a sound in these experiments are satisfied with the data to desire thermoacoustic refrigerator.

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 열·유체 전공

2) 한국해양대학교 기계냉동자동차 공학부 교수

## 제 1 장 서 론

### 1.1 연구 배경

열음향 냉동기의 특징은 정재파(standing wave)에 의한 유체의 단열 압축 또는 팽창 시에 형성되는 온도의 진폭에 특정한 매개체를 도입하여 냉동하는 방식이다. 냉동기에 있어서 중요한 요소인 냉매를 He과 같은 비 활성의 기체로 대체하여 환경오염에 대한 우려가 없고, 기존의 냉동기가 공통으로 가지고 있는 압축기를 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다. 이것은 상당히 중요한 것으로 냉동기의 신뢰도를 높이는 결정적 요인이 된다. 그 이유는 압축기가 없으므로 소음 및 진동 문제가 해소되고 시스템의 수명 연장 및 부품의 단순화를 가져올 수 있기 때문이다. 또한 고온 초전도 물질이 발견되고 전자회로의 고속화, 고집적화가 가속화 될수록 이들을 효과적으로 냉각시킬 수 있는 시스템이 요구되는데 여기서도 냉동시스템의 신뢰도가 차지하는 비중은 실로 막중한 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 열음향 냉동기술은 21세기 냉장 및 냉동시스템의 상당 부분을 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

### 1.2 연구 내용

본 논문의 연구목적은 열구동식 열음향 냉동기를 설계하기 위하여 필요한 데이터를 열음향 발생기의 실험으로부터 얻는 것이다. 즉, 음향이 발생된 온도와 지속적으로 음향을 유지시키는 온도범위를 얻는 것이다. 그리고 앞으로의 연구진행 방향을 제시하려고 한다.

## 제 2 장 열음향 발생이론

### 2.1 진동 온도

유체의 단열 압축 및 팽창은 기체의 온도를 상승 또는 하강시켜 온도에 변화 폭을 발생시키게 되지만 이 양은 매우 적어서 일상 생활에서는 못 느끼고 지나간다. 예로서 보통 수준의 대화에 의해 발생하는 공기중의 온도 진폭은 0.0001℃ 정도의 크기를 가지고 있다. 그러나 공명관 내부에서는 음압을 170dB 이상으로 증가시킬 수 있어 수℃ 정도의 온도 진폭을 유발하게 된다<sup>1)</sup>.

Fig. 1은 하나의 작은 고체 평판이 정재파의 진동방향에 병렬로 배치되어 있는 그림이다. 음압  $p_1$ 에 의해 형성되는 온도 변화 폭은 식 (1)에 의해 표현된다.

$$\frac{T_1}{T_m} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{p_1}{p_m} \quad (1)$$

식 (1)로부터 온도 진폭의 크기는 음압의 크기에 비례함을 알 수 있다. 이렇게 형성된 온도 진폭에 얇은 박판이 개재되면 기체와 박판 사이에 열경계층(thermal

boundary)이 형성되고 이 열경계층을 통해서 열이 전달된다.<sup>2)</sup> 이때 발생하는 열경계층의 열 침투깊이( $\delta_t$ )는 식 (2)로 표현된다.

$$\delta_t = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \tag{2}$$

전통하는 유체온도  $T_1$ 은 식 (3)과 같다.

$$T_1 = \left( \frac{T_m \beta}{\rho_m c_p} p - \frac{\nabla T_m}{\omega} u \right) (1 - e^{-(1+i)y/\delta_t}) \tag{3}$$

여기에서 알 수 있듯이 온도 진폭  $T_1$ 은 거리  $y$ 에 의해 크기 및 위상이 모두 달라지는데 이것은 Fig. 2에 잘 나타나 있다. 식 (3)에서  $y$ 값에 의존하는 부분, 즉  $1 - e^{-(1+i)y/\delta_t}$  을 살펴보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 이 부분은 복소수이며 Fig. 2와 같이  $y/\delta_t$ 에 따르는 실수 값과 허수 값이 존재한다. 이 복소수의 크기는  $y \gg \delta_t$  일 때 1로 근접하며  $y \ll \delta_t$  일 때 0으로 수렴한다. 여기서 중요한 부분은  $y = \delta_t$  일 때로서 복소수의 크기는 역시 1에 가까우나 상당량의 허수부를 포함하고 있다는 것이다. 이는 물리적인 의미로 볼 때 경재파에 의한 기체의 온도진폭에 위상차가 존재한다는 것을 의미하고 있다.

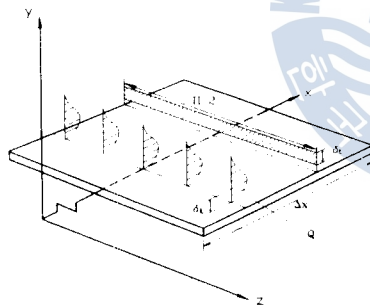


Fig. 1 The heat-flux density along x near the surface of the plate

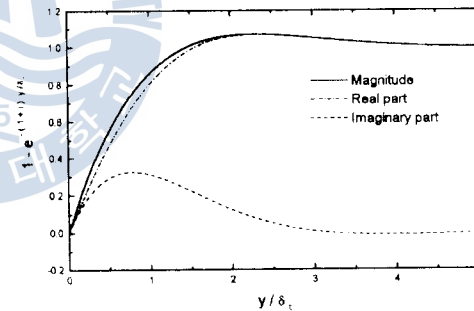


Fig. 2 Normalized distance from the plate surface

## 2.2 열유속

평판을 따라 x방향으로 흐르는 열유속  $\dot{Q}$ 는 식 (4)와 같다.

$$\dot{Q} = -\frac{1}{4} \pi \delta_t T_m \beta p_1^s u_1^s (\Gamma - 1) \tag{4}$$

또한 박판 길이 방향으로의 열 흐름이 일어나지 않는 한계 온도구배는 식 (5)와 같다.

$$\nabla T_{crit} = \frac{T_m \beta \omega p_1^s}{\rho_m c_p u_1^s} \tag{5}$$

## 2.3 일유속

평판에서의 발생되는 일유속  $\dot{W}$ 는  $T_1$ 에 대한 식 (3)을 이용하여 식 (6)으로 얻을 수 있다.

$$\dot{W} = \frac{1}{4} \Pi \delta_i \Delta x \frac{T_m \beta^2 \omega}{\rho_m c_p} (p_1^s)^2 (\Gamma - 1) \quad (6)$$

온도구배가 충분히 작을 경우, 즉  $\Gamma - 1 < 0$  일 때 식 (4)에서 주어진 열유속은 양의  $x$ 방향이고, 식 (6)은 음의 값이 나온다. 즉, 열은 저온에서 고온으로 이동하고 평판 근처에서의 일유속은 흡수하게 된다. 이것은 heat pump 이다. 비슷하게 충분히 큰 온도구배에서  $\Gamma - 1 > 0$  이고 열유속은 음의 값이 나오고 일유속은 양의 값이 나오게 되어 열은 고온에서 저온으로 흐르고 일유속은 발생된다. 이 장치가 prime mover이다.

정재파에 대한 효율은 식 (5)와 식 (6)의 비로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \Delta x \beta \omega p_1^s / \rho_m c_p u_1^s \quad (7)$$

## 제 3 장 실험장비의 구성 및 제작과정

### 3.1 열교환기

Fig. 3은 실험에 사용되는 부품의 사진이다.

열교환기는 박판집적체의 양단에 열을 공급하거나 배출하기 위하여 필요하다. 열음향 발생기에서 사용된 열교환기는 기존 개념의 열교환기와는 형상이 다르다. Fig. 4와 같이 우선 공명관에 삽입되기 위하여 열교환기는 실린더의 형태이어야 하고 공명관 내부에서 흐르는 유체의 흐름을 방해하지 않기 위하여 fin의 형상이 되어야 한다. 열교환기는 열 침투 깊이 만큼의 거리를 유지하기 위하여 박판집적체와 매우 가까운 위치에 근접하거나 닿아 있어야 한다.

열교환기는 Hofler가 제시한 제작방법<sup>3)</sup>을 참고한 후에 응용하여 제작하였다. 구리 열교환기의 제작에는 열교환기의 공간( $2y_{hx}$ )을 형성하는 알루미늄(0.3mm)과 열교환기의 두께( $2l_{hx}$ )를 형성하는 얇은 구리판(0.2mm)이 필요하다. 열교환기를 얻기 위하여 전 처리<sup>4)</sup>한 뒤에 도금을 한다. 윗면과 아래면(Fig. 4의 A)은 도금이 되지 않게 하기 위하여 테이프를 부친다. 원주 면(Fig. 4의 B)은 구리 도금되어 합쳐진다. 도금된 고온 열교환기는 실린더 외경을 선반 가공하여 스테인레스 강 튜브의 내경에 일치시킨다. 저온 열교환기는 공명관의 내경에 맞게 선반가공 한다. 고온 열교환기와 스테인레스 강 튜브의 틈 사이(Fig. 4의 C)에 접촉 열저항을 줄여 열전달이 잘 되도록 하기 위하여 스테인레스 강 튜브와 미완성의 열교환기를 다시 도금한다. 도금이 종료되면 수산화나트륨(NaOH)을 물에 용해시킨 뒤, 100℃로 가열한 용액을 준비한다. 그리고 용액에 열교환기를 넣어 알루미늄을 제거한다.

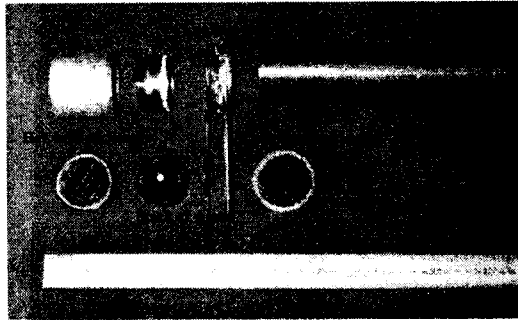


Fig. 3 The photograph for each part of thermoacoustic generator

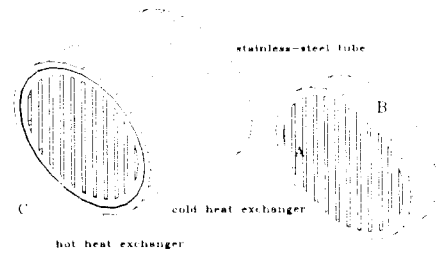


Fig. 4 Hot heat exchanger and cold heat exchanger

### 3.2 막판집적체

막판집적체는 Fig. 1에 적도 보듯이 열침투 깊이의 2배 정도가 되는 거리에 이르러면 열유속의 값이 매우 작아진다. 그러므로 이 거리를 열유속이 유효한 거리로 보고 있으며, 막판을 열 침투 깊이의 4배에 해당하는 간격으로 일정하게 개재시켜야 한다. 또한 막판자체에 대한 x축 방향으로의 열전도를 최소화하기 위하여 가능한 얇은 평판을 사용해야 한다. 평판은 일사적인 열시장소의 역할을 할 뿐 열의 이동은 기체를 통하여 이루어진다.

### 3.3 공명관

공명관은 막판집적체, 열교환기를 감싸주고 음원 구동부에 연결되는 구조물로서 내부 충전가스의 공명현상에 의한 고음압의 정재파를 형성시켜 주는 기능을 가진다. 최상의 공명관은 음향 동력이 열로 소산되는 것을 최소화할 수 있어야 한다.

## 제 4 장 열음향 발생 실험

### 4.1 실험장치

Fig. 5는 본 연구에 사용된 실험장치의 전체 계통도를 보여주고 있다. 음향을 발생시키는 열음향 발생기, 열음향 발생기의 point별 온도를 측정하기 위한 열전대와 온도 측정기, 열교환기를 냉각시키기 위한 냉각부가 있고 음향을 정확하게 측정하기 위한 마이크로폰과 스펙트럼 분석기 그리고 FFT로부터 받은 data를 편리하게 조작할 수 있는 개인 컴퓨터로 구성되어 있다.

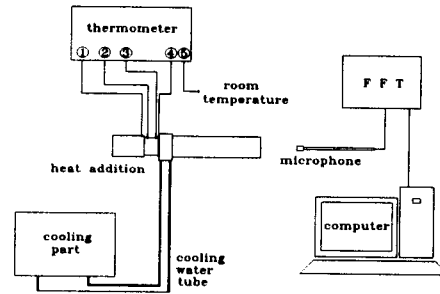


Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus

## 4.2 열음향 발생기

본 논문에서 사용된 열음향 발생기는 두 가지의 형태이다. 하나는 Swift의 논문<sup>5)</sup>에서 인용한 것으로서 Fig. 6과 같다. 그리고 다른 하나는 Fig. 7과 같이 Swift 논문을 참고하여 설계하고 제작한 열음향 발생기로서 규모가 두 배정도 크다. Swift의 논문에서 인용한 열음향 발생기를 편의상 16cm 열음향 발생기로 하고, 16cm 열음향 발생기보다 규모가 큰 열음향 발생기를 34cm 열음향 발생기로 하겠다.

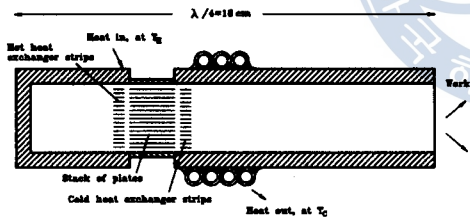


Fig. 6 16cm thermoacoustic generator

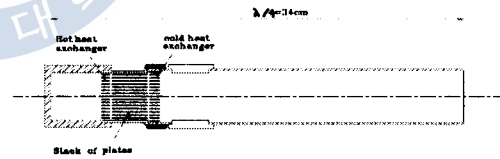


Fig. 7 34cm thermoacoustic generator

## 4.3 실험 방법

16cm 열음향 발생기 실험에 사용된 열전대는 Omega 사가 제작한 E type으로 선 직경은 0.005 inch이다. 열전대를 사용하여 온도를 측정한 부분은 Fig. 8과 같이 박판 집적체 양 끝단의 온도구배를 측정할 수 있는 위치(②,③)와 고온과 저온 열교환기가 있는 위치(①,④) 그리고 실내의 온도(⑤). 모두 5개의 열전대를 사용하여 측정하였다. 고온의 열원은 부탄가스 화염으로 하였다. 음향이 발생하기 위한 최적의 온도구배를 얻기 위하여 저온측 공명관과 스테인레스 튜브를 연납처리 하였고 고온측은 400℃ 이상 올라가기 때문에 고온용 시멘트를 이용하여 구동부와 스테인레스 튜브사이의 틈을 밀봉하였다.

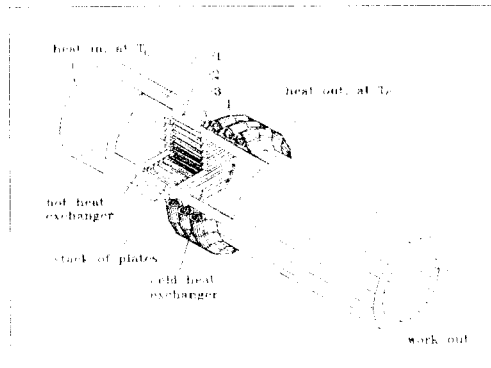


Fig. 8 The schematic diagram of the internal part and the measurement points of temperature

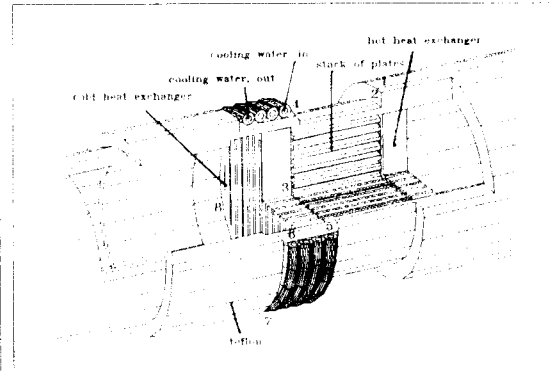


Fig. 9 The internal section of thermoacoustic generator and the measurement points of temperature

34cm 열음향 발생기의 온도 측정점을 Fig. 9와 같다. 1은 구동부 측의 온도이고, 2는 박판집적체의 고온부 온도( $T_{H1}$ )이다. 3은 박판집적체의 저온부 온도( $T_C$ )이고, 4는 박판집적체를 포함하는 스테인리스 튜브와 저온 열교환기를 포함하는 냉각부사이의 온도이다. 5는 유입되는 냉각수의 온도이고, 6은 유출되는 냉각수의 온도이다. 7은 유출되는 냉각수의 구리 파이프와 공명관이 접촉되어 있는 곳의 온도이다. 8은 저온측 열교환기의 온도이다.

## 제 5 장 실험결과 및 고찰

### 5.1 16cm 열음향 발생기의 실험결과 및 고찰

부탄가스로 구동부를 가열하면 ①의 온도가 360℃, ②의 온도는 340℃, ③의 온도는 130℃, ④의 온도는 23℃일 때 음향이 발생하기 시작한다. ②,③의 온도가 380℃와 140℃가 될 때 가장 큰 음향이 발생하게 되며, 그 음향은 정상상태에 도달했다고 할 수 있다. 이 때 ①, ④의 온도는 각각 400℃, 23℃이다. ①의 온도는 410~400℃사이를 유지할 때 음향은 약간씩 변하지만 그 일유속의 값은 거의 일정하게 유지된다. 정상상태에 도달하였을 때에 음향을 측정하였고 구동부에서 가열기를 제거하였다.

기준거리인 1m에서의 음향 측정결과를 Fig. 10과 같이 overall의 값은 112.0dB/ref이다. 그리고 peak 값은 518Hz에서 109.5dB이고 제2의 harmonic과 제3의 harmonic의 값은 각각 1038Hz에서 56.8dB과 1556Hz에서 54.5dB이다. 0~500Hz의 주파수대역은 실험실 내에서 발생한 소음 때문에 발생되었다. 즉 부탄가스의 가열 소음과 냉각수가 구리 관을 흐르고 배출되어 나아갈 때 발생하는 소음 그리고 그 외의 소음이 합쳐진 영역이다.



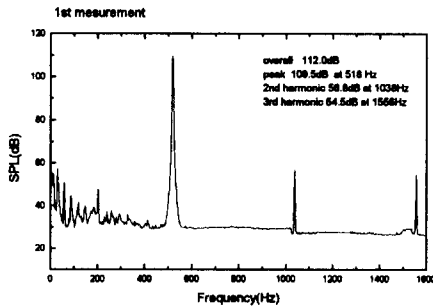


Fig. 10 The result of the 1st measurement

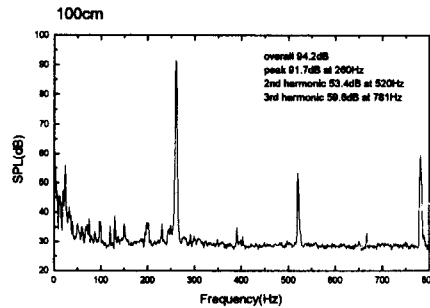


Fig. 11 The result of measurement at 1m away (reference distance)

## 5.2 34cm 열음향 발생기의 실험결과 및 고찰

34cm 열음향 발생기의 실험은 16cm 열음향 발생기의 실험조건과 마찬가지로이다. 1m의 수평거리에서 측정된 것이다. 이 거리를 열음향 측정의 기준거리로 하고 이후에 측정하는 모든 값의 기본이 된다. 박판집적체 양단의 온도차이( $\Delta T$ )는 280℃이다. 1의 온도는 430℃, 2는 340℃, 3은 60℃, 4는 80℃, 5는 23.1℃, 6,7,8은 각각 24.8℃, 25.4℃, 27.8℃ 이다.

Fig. 11은 100cm의 수평거리에서 측정된 그래프이다. overall 의 값은 94.2dB이고 가장 최고의 값은 260Hz에서 91.7dB이다. 그리고 제2의 harmonic은 520Hz에서 53.4dB 이고 제3의 harmonic은 781Hz에서 59.6dB이다.

## 5.3 수치 계산 결과와 실험결과의 비교

실험에 적용되고 수치 계산에 필요한 물성치(properties)들은 Table 1과 같다. Table 1의 물성치와 앞장의 공식을 이용하여 수치 계산을 한다. 계산하려는 값은 무차원 온도구배, 열유속, 일유속이다. 열 기관이 prime mover가 되기 위한  $\Gamma$  값을 알아보기 위하여 한계온도에 대한 식 (5)를 사용한다. 그리고 열유속에 대한 식 (4)를 사용하여 계산하고, 일유속은 식 (6)을 이용하여 계산한다.

압력진폭  $P_A$ 의 값을 얻기 위하여 마이크로폰을 공명관의 끝단에 설치한다. 압력진폭  $P_A$ 의 값은 16cm 열음향 발생기가 200Pa이고 34cm 열음향 발생기가 112Pa이다. 수치 계산 결과에서 무차원 온도구배  $\Gamma$ 의 값이 모두 1보다 큰 값으로 산출되었다. 열유속의 값은 16cm 열음향 발생기가 0.08W이고 34cm 열음향 발생기가 0.208W이다. 평판근처에서 열유속은 고온에서 저온으로 흐르게 된다. 일유속의 값은 16cm 열음향 발생기가 0.002W이고 34cm 열음향 발생기가 0.004W이다. 즉,  $\dot{W}$ 의 값은 0보다 큰 값이 되어 평판에서 음향이 발생되게 된다는 것을 알 수 있다. 이 값들은 앞장에 설명한 것과 같이 prime mover가 되기 위한 조건에 적합한 값들이다.



Table 1 Thermo-physical properties of air for 16cm thermoacoustic generator and 34cm thermoacoustic generator

	16cm thermoacoustic generator (at $T_m=533K, P_m=1bar$ )	34cm thermoacoustic generator (at $T_m=474K, P_m=1bar$ )
Air	$\gamma = 1.4$ $\rho_m = 0.6589 \text{ kg/m}^3$ $c = 462.77 \text{ m/s}$ $c_p = 1036 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ $Pr = 0.682$ $k = 0.0425 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	$\gamma = 1.4$ $\rho_m = 0.7456 \text{ kg/m}^3$ $c = 436.4 \text{ m/s}$ $c_p = 1024 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ $Pr = 0.682$ $k = 0.0386 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

본문에서 제시한 공식을 이용한 수치 계산 값과 열역학 공식 그리고 음향학 공식으로 열음속과 일음속의 값을 계산하여 비교하고자 한다. 먼저 음향학을 통하여 열음속은 식 (8)과 같다.

$$W = 10^{-12} \times 10^{\frac{SH}{10}} \times 2\pi r^2 \quad [W] \quad (8)$$

열음속의 값은 16cm 열음향 발생기가 0.063W이고 34cm 열음향 발생기가 0.016W이다.

구동부에 공급된 열량은 구할 수 없지만 냉각수에 의하여 방출되는 열량은 식 (9)로 구할 수 있다.

$$Q_c = \dot{m}C(T_H - T_C) \quad (9)$$

여기서 물의 비열(C)은 4.19J/kg·K이고, 16cm 열음향 발생기와 34cm 열음향 발생기의 질량유량은 각각 0.019kg/s, 0.011kg/s이다. 냉각수의 온도차 ( $T_H - T_C$ )는 2K이다.

방출되는 열량의 값은 16cm 열음향 발생기가 0.16W이고 34cm 열음향 발생기가 0.093W이다.  $Q_c$ 는 방출되는 열량이기 때문에 공급되는 열량( $Q_H$ )을 구하여 효율( $\eta$ )을 구하는 식 (10)에 대입한다. 효율의 값은 16cm 열음향 발생기가 28.19% 이고 34cm 열음향 발생기가 14.68% 이다.

$$\eta = \frac{\text{desired output}}{\text{required input}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{W}{Q_c + W} \quad (10)$$

## 제 6 장 결론 및 제언

지금까지 열음향이 발생하는 원리를 열음속과 일음속에 대한 식으로 살펴보았다. 그리고 16cm 열음향 발생기와 34cm 열음향 발생기의 실험으로부터 다음과 같은 결론

을 유도할 수 있다.

- 1) 마이크로폰으로 측정된 음압진폭의 값을 수치계산에 적용하여 얻은 값이 열음향 발생기가 되기 위한 조건을 모두 만족시키고, 기준거리에서 측정된 음압레벨 값이 100dB로 나왔기 때문에 열구동식 열음향 냉동기를 제작하는 데에 사용할 수 있는 수치로는 적합하다고 볼 수 있다.
  - 2) 음향이 발생하는 박판집적체의 폭( $\Delta x$ )과 양단의 온도차이( $\Delta T$ )가 일유속 값의 크기를 결정한다. 즉, 열음향 발생기를 설계할 때 중요한 요소는 박판집적체의 폭과 양단의 온도차이이다. 그러므로 박판집적체의 폭과 양단의 온도차이 사이의 관계를 유지하고 최적의 값으로 설계를 해야 한다.
- 향후 연구과제는 열음향 발생기에서 발생한 일유속을 이용하여 보다 효율적인 열구동식 열음향 냉동기를 개발하는 것과 일유속 값을 증가시키기 위하여 공명관 내부의 압력( $p_m$ )과 압력진폭( $P_A$ )을 유지하기 위한 방법을 찾는 것이다.

### 참고 문헌

- [1] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics", Wiley, New York, 3rd ed., 1982, p. 263
- [2] Carter, R. L., White, M. and Steele, A. M., (private communication of Atomic International Division of North American Aviation, Inc), 1962
- [3] Hofler Thomas James "Thermoacoustic Refrigeration Design and Performance" Ph. D. dissertation, Physics Department University of California at San Diego, 1986, pp.130-139
- [4] 염희택 · 이주성 공저, "도금 · 표면처리", 문운당, 1989, p. 85
- [5] G. W. Swift, "Thermoacoustic engines", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 84, NO. 4, 1988, p. 1147
- [6] Yunus A. Çengel & Michael A. Boles, "Thermodynamics", McGraw-Hill, ed., 1994, pp. 244-245