

열음향파 발생장치의 최적 작동 조건에 대한 실험적 연구

신상웅* · 오승진* · 이윤준* · 김남진* · 천원기**

* 제주대학교 에너지공학과

Study of Optimum Operating Conditions of Thermal Acoustic Generator

Sang Woong Shin*, Seung Jin Oh*, Yoon Joon Lee*, Nam Jin Kim* and Wongee Chun**

* Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju Nat'l Univ.

(Received June 7, 2012 ; Revised October 13, 2012 ; Accepted October 22, 2012)

Key Words: Thermal Acoustic Waves(열음향파), High Frequency(고주파), Sound Pressure Level(음압레벨), Sound Power(음향 파워)

초록: 본 연구에서는 열음향 시스템의 음향파 출력에 대한 주요한 기하학적 변수에 대해 다루고 있다. 음향파의 출력은 스택의 위치와 스택의 길이, 입력 파워와 공진기의 길이에 의존한다. 본 실험을 통하여 최고의 실험 조건을 얻을 수 있었다. 실험결과에 의하면 최고 음압레벨은 폐쇄된 부분에서 공진기길이의 1/4 -1/2지점 사이에 스택을 위치시켰을 때, 공진기와 스택의 길이가 길 때, 그리고 입력전압이 증가할 때 나타난다. 또한 주파수의 경우 공진기의 길이가 200mm일 때 437Hz, 100mm일 때 885Hz를 기록하였다. 연구 결과 공진기의 길이가 짧을수록 더 높은 주파수를 얻을 수 있는 것을 알 수 있다.

Abstract: This study deals with the effects of major geometric parameters on the sound wave output of a thermal acoustic system. The output power of the acoustic wave was dependent on the stack position, stack length, resonator tube length, and input power. In experiments, the maximum SPL was generated when the stack was placed between one-fourth to half, resonator and stack length were longer, and input power was increased. The frequency was recorded to be 437 and 885 Hz when the resonator tube length was 200 and 100 mm, respectively. Therefore, when the resonator tube length was shorter, a higher frequency was recorded.

- 기호설명 -

- d : 공명 튜브 열린 끝에서부터 스택까지의 거리, mm
- l : 스택의 길이, mm
- L : 공명 튜브의 길이, mm
- a : 음속, m/s
- λ : 파장, m
- P_{rms} : rms 음압, dB
- P_{ref} : 기준음압, dB

1. 서론

열음향(Thermoacoustic)이란 열역학적 메카니즘에 의해 열에너지를 음향에너지로의 변환 또는 그

역과정을 의미한다. 이런 현상을 이용한 열음향 엔진 또는 냉동기는 구동부가 없고 구조가 간단하기 때문에 에너지 손실을 줄일 수 있으며 공급에너지 원으로 폐열 또는 태양에너지를 사용할 수 있는 장점이 있다.

최초 열음향 현상은 200년 전 유럽의 유리를 부는 직공들에 의해 처음 관찰되었다. 유리를 부는 직공들은 찬 유리관을 뜨거운 유리관 옆에 놓을 때 소리가 나는 것을 발견하였으며, 이러한 현상을 Sondhauss가 처음으로 연구하여 한쪽 끝이 막힌 유리관을 Sondhauss관이라고 호칭하였다. 이 후 Carter와 그의 동료들이 Sondhauss관 내부에 스택(Stack)을 도입함으로써 효율을 개선하였으며, Feldman의 박사논문 연구에서는 이에 근거하여 600W의 열로부터 27W의 음향 파워를 성공적으로 만들어내었다.^(1,2) 또한 Tijani와 2명은 열음향 기기의 성능에 대한 스택 사이즈의 효과에 대한 실험

† Corresponding Author, wgchun@jejunu.ac.kr

결과를 보고하였으며,⁽³⁾ Symko에 의해 개발된 열음향 레이저는 24kHz까지 음향파를 발생시켰다. 발생된 음향에너지는 직경 3cm의 압전소자(PZT)를 사용하여 전기에너지로 변환되었다.^(4,5) 국내에서의 열음향 관련 연구를 살펴보면 Y.T Kim의 1명은 스택에 걸친 온도 차이에 근거하여 열음향 레이저에 대한 스택 위치의 의존성을 연구하였다.⁽⁶⁾ 하지만 아직까지 국내에서의 열음향 관련 연구는 활발히 진행되고 있지 않다.

본 연구에서는 이러한 열음향 시스템의 기하학적 구조에 대한 파라미터를 변화시킴으로써 열음향 레이저의 SPL(Sound Pressure Level)과 주파수를 측정하여 최적 작동조건을 파악하였다.

2. 이론 고찰

2.1 열음향 시스템 원리

열음향 시스템의 기본 구성요소는 공진기(Resonator), 스택(Stack), 그리고 스택을 지나가는 두 개의 열 교환기(Heat Exchanger)이다. 공진기는 한 끝이 폐쇄되어있고 다른 끝은 개방되어 있는 유리관이다. 열음향 시스템에 사용된 스택은 세라믹 자동 촉매 변환기의 플러그이다. 온열교환기는 세라믹 플러그의 한끝에 있는 홈에 니크롬선을 감아 만들었다. 그리고 스택의 다른 끝은 공진기의 개구부와 마주하기 때문에, 자연적인 대류와 방열로 인해 냉각이 발생한다. 한 쪽 끝에 있는 열선을 통해 흐르는 전류는 스택에 걸쳐 온도 구배를 만들며 온도 구배가 임계온도차를 넘을 경우, 공진기에 있는 공기가 진동하여 음향 출력을 발생시킨다. 이때 발생된 음향 출력을 SPL(Sound Pressure Level)이라고 하며 단위는 dB로 나타낸다. 이러한 음압은 SPL(Sound Pressure Level) 측정기를 사용하여 비교적 쉽게 측정된다. 다음과 같은 식을 사용하면 압력 진동의 rms값을 계산할 수 있다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (1)$$

여기에서 P_{rms} 는 측정되는 rms음압 이며 P_{ref} 는 기준 음압이다.

이런 열음향 시스템의 기본 작동원리를 이해하기 위해, G.W. Swift는 라그랑지안(Lagrangian) 관점에서의 열음향 현상에 대해 연구하였다.⁽⁷⁾ Fig. 1은 Brayton 사이클과 동일한 열음향 발전의 사이클을 나타내고 있다. 이해를 단순화하기 위해, 음파는

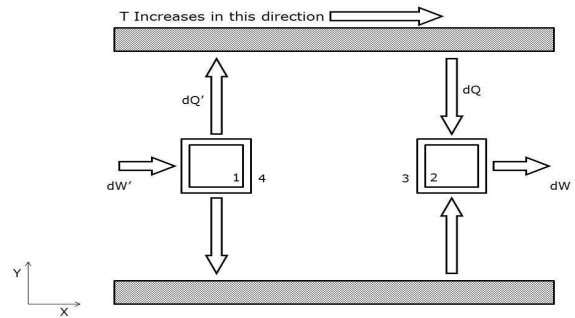


Fig. 1 Prime mover- Lagrangian view point

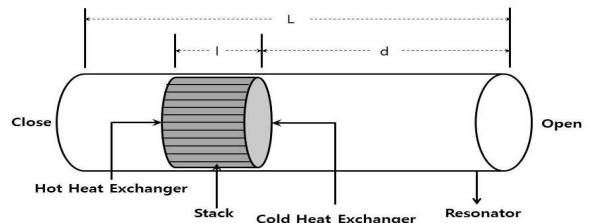


Fig. 2 Thermoacoustic Laser

사인파가 아닌 방형파라고 간주한다. 이는 열음향 발전 사이클이 두 개의 가역 단열 과정과 두 개의 비가역 등압 과정을 가지기 때문이다.

일반적인 열 엔진에서 밸브와 피스톤은 엔진의 작동을 위해 정확한 타이밍으로 움직인다. 그에 반해 열음향 시스템은 구동부를 가지고 있지는 않으나, 시스템의 다공성 스택단면과 그 사이에 흐르는 유체에 의해 유사한 단계가 관찰된다. 유체가 음향 주파수를 가진 변환기에서 진동할 경우, 음파와 스택과 공진기의 접촉단면에서의 단열팽창과 유체압축에 의해 유체의 온도에 변화가 생긴다. 유체와 단면 사이의 열전달은 낮기 때문에 유체온도를 순간적으로 변화시키지는 않는다. 대신 유체와 단면 사이의 열전달은 열역학 사이클을 통해 유체를 움직이는데 필요한 온도, 압력 및 동작 간에 시간 차를 만들어 낸다. 따라서 유체와 단면 사이의 비가역적 열전달이 열음향 시스템을 작동시킨다. 다시 말하면 낮은 열전달이 유체의 온도 변화에 대해 적절한 위상조절을 하는 것이다. 실제 사인음파의 경우, 단면에서 열 침투 깊이 δ_k 에 있는 유체에 적용된다. 열 침투 깊이란 열이 시간 $1/\omega$ 동안에 유체를 통해 확산될 수 있는 거리를 말하며 여기에서 ω 는 음파의 각 주파수(angular frequency)를 의미한다. 단면에서부터 열 침투 깊이 내에 있는 공기는 이동하는 시간과 열전달 되는 시간이 충분

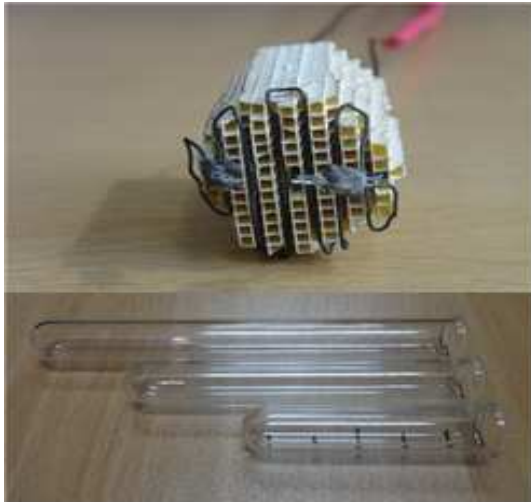


Fig. 3 Original Celcor ceramic catalytic converter and the stack

할 만큼 단면과 열전달을 한다.

이러한 열음향 레이저는 다음과 같은 식을 이용하여 음향출력을 구할 수 있다.

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

여기서 T_m 은 평균 유체온도이고, β 는 일반 열팽창률, C_p 는 정압 열용량, ω 는 파장의 각 주파수, ρ_m 은 유체의 밀도, p_1^s 는 정상파에서의 압력, δ_k 는 열 침투 깊이, $\Gamma = \Delta T_m / \Delta T_{crit}$ 는 임계 열변화율 대비 실제 열 변화율이다.

열음향과 발생장치는 Fig. 2에 나타나 있다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 스택을 잘라 니크 롱선을 연결하고 길이가 다른 공진기를 사용하여 스택의 위치, 길이 그리고 공진기 길이를 포함한 기하학적 구조의 변수들을 변경하여 출력을 측정하였다.

열음향 시스템의 최적 작동조건을 알아보기 위해 Table 1의 조건으로 실험하였다.

Table 1에서 d 는 공진기 개구부로부터 스택(Stack)의 거리이며, l 은 스택의 길이, 그리고 L 은 공진기의 길이이다.

Case 1은 공진기 내에서의 스택의 최적 위치를 측정하였으며 이때 일관성을 유지하는지 확인하기 위해 스택의 길이와 공진기의 길이를 변경하였다. Case 2는 Fig. 4에 나타나 있듯이 공진기를 서로 다른 3 방향에 맞추어 SPL(Sound Pressure Level)을 측정하였고 개구부로부터 SPL(Sound Pressure

Table 1 Different conditions for conducting experiments

	d (cm)	l (cm)	L (cm)	입력 전압(V)
Case 1	2,4,6,8...	1.25, 2.5, 5	15, 20	6
Case 2	L/4	2.5	20	6
Case 3	L/4	1.25, 2.5	15, 20	6
Case 4	5, 6	2.5	15, 20	6
Case 5	L/4	2.5	20	6, 6.5
Case 6	L/4	2.5	10, 20	6

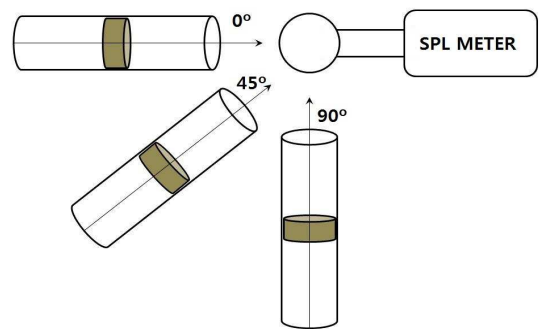


Fig. 4 Sound pressure level meter used to measure the pressure level in all three orientations and various distances from the open end of the laser tube.

Level) 측정기의 거리를 변화시키면서 SPL(Sound Pressure Level)을 측정하였다. Case 3은 스택의 길이를 변경하며 스택의 길이에 따른 SPL(Sound Pressure Level)을 측정하였다. Case 4는 공진기의 길이를 변경하여 길이에 따른 SPL(Sound Pressure Level)을 측정하였으며, Case 5는 앞선 실험의 결과를 바탕으로 한 최적조건을 이용하여 입력전압에 따른 SPL(Sound Pressure Level)값을 측정하였다. 또한 Case 6에서는 스택의 길이를 일정하게 하고 길이가 다른 두 개의 공진기에 대한 주파수를 측정하였다.

열음향 시스템의 출력주파수를 측정하기 위하여 NI사의 DAQ를 사용하였으며, 또한 주파수를 수집하기 위해 단일지향성 마이크를 사용하였다. 주파수를 측정할 때 측정기의 차단으로 인한 교란을 피하기 위해, 마이크를 공진기 측에 일직선으로 정렬시키고 공진기의 입구에서 10cm떨어진 곳에서 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 스택 위치대비 SPL

공진기내에서 SPL(Sound Pressure Level)값이 최

대가 되는 스택의 최적 위치를 확인하기 위하여, 15cm길이의 1/4파장 열음향 시스템과 20cm길이의 1/4파장 열음향 시스템을 테스트 하였다. 실험에는 두께 1.25cm, 2.5cm, 그리고 5cm의 3가지 다른 스택을 사용하였다.

Fig. 5 - 7을 통하여 모든 실험 조건에 대해 일관적으로 공진기의 폐쇄된 끝에서부터 공진기 길이의 약 1/4 - 1/2 지점 사이에 스택이 위치하였을 때 SPL(Sound Pressure Level)의 값이 최대로 나타나는 것을 알 수 있다. 이론적으로는 식 (2)에서 나타나듯이 최대 SPL(Sound Pressure Level)값은 스택이 공진기 중심에 위치하였을 때 나타난다. 또한 음향 강도에 대한 스택 위치의 효과에 대해 연구한 Kwon.Y.S에 의하면,⁽⁸⁾ 최대출력은 공진기의 1/3과 1/2지점 사이에서 나타난다. 그러나 본 연구에서 얻은 결과에 의하면 최대 출력이 공진기 길이의 1/4 - 1/2지점 사이에서 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2 공진기 개구부에서 거리대비 SPL

3개의 열음향파 발생장치를 Fig. 4와 같이 각각 다른 방향(0°, 45°, 90°)에서 SPL(Sound Pressure Level)값을 측정하는 실험을 하였다. 또한 SPL미터와 장치 사이의 거리를 변화시키면서 측정하였다.

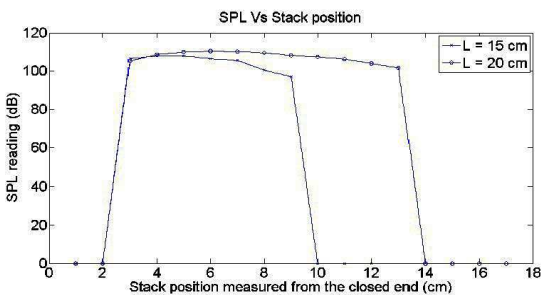


Fig. 5 SPL vs Stack position for tube length, L = 15 cm and L = 20 cm with stack length l = 2.5 cm

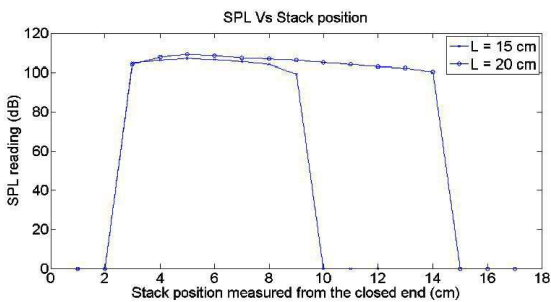


Fig. 6 SPL vs Stack position for tube length, L = 15 cm and L = 20 cm with stack length l = 1.25 cm

여러 방향에서 측정된 SPL(Sound Pressure Level) 값은 Fig. 8과 같이 미세한 차이만 보였다. 따라서 파장은 원의 형태로 확산된다는 것을 알 수 있다. 또한 SPL(Sound Pressure Level)은 공진기 개구부에서부터 거리에 따라 급격하게 감소되었으며 개구부에서 먼 거리에 있을 지라도 거의 동일하였다. 약간 증가한 SPL(Sound Pressure Level)은 공진기 개구부로부터 약 1/2 파장의 거리에서 관측되었다. 이론적으로 평면 정상파(plane standing wave)에서의 배기진폭(air displacement amplitude)은 1/2 위치에서 최고이다. 정상파에서 유체가 SPL(Sound Pressure Level)측정기 표면에 충격을 줄 때, 공기의 흐름이 감소되기 때문에 공진기 개구부의 압력진동은 0이 되고, 유속은 가장 높기 때문에 공진기 개구부에서 가장 높은 SPL(Sound Pressure Level)이 측정된다.

3.3 스택 길이 대비 SPL

열음향 레이저의 핵심이자 가장 중요한 부분은 스택(Stack)이다. 열음향 현상은 스택 소재 단면 옆에 있는 작은 열 경계층(δ_k)에서 발생한다. 스택 길이에 따른 SPL(Sound Pressure Level)값은 1.25cm, 2.5cm두개의 스택이 테스트되었다. 앞선 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 스택을 최적위치인 L/4 - L/2지점 사이에 위치시켰다.

실험결과를 살펴보면 SPL(Sound Pressure Level)의 최대 및 평균값은 스택의 길이가 증가할수록 높게 측정되었다. SPL(Sound Pressure Level)에 대한 스택 길이의 효과는 길이가 다른 두 개의 공진기에서 관찰 되었으면 결과는 Fig.9, 10에 나타나 있다.

식 (2)에 의하면 SPL(Sound Pressure Level)은 $\Pi\delta_k\Delta x$ 값에 비례한다. $\Pi\delta_k\Delta x$ 는 단면으로부터 열 침투 깊이 내에 존재하는 유체의 부피이다. 스택의

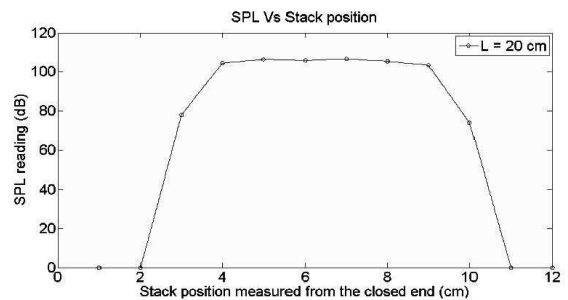


Fig. 7 SPL vs Stack position for tube length, L = 20 cm with stack length l = 5 cm

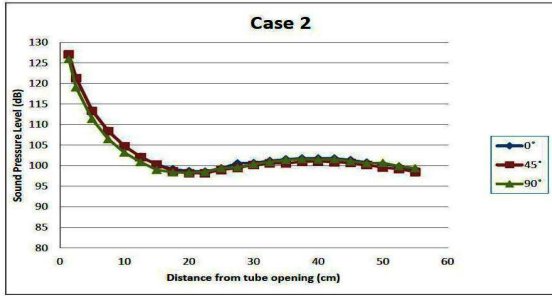


Fig. 8 SPL measurements vs distance from the open end of the prime mover

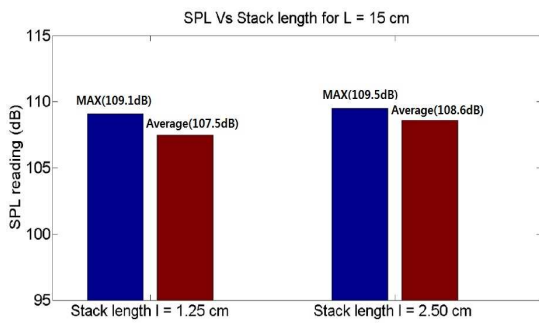


Fig. 9 SPL (max and average) vs Stack Length for tube length L = 15 cm

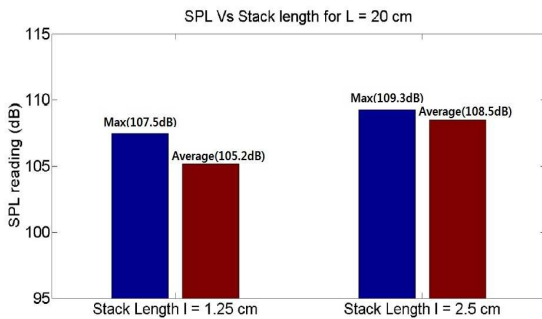


Fig. 10 SPL(max and average) vs Stack length for tube length L = 20 cm

길이 Δx 가 증가하면 유체의 부피도 증가한다. 또한 SPL(Sound Pressure Level)은 임계 열 변화율에 대한 실제 열 변화율인 $\Gamma = \nabla T_m / \nabla T_{crit}$ 에 비례한다. 스택 길이가 증가하고 입력 전력이 동일하게 유지될 경우, 온도 변화율 ∇T_m 은 감소한다. 따라서 스택의 길이를 증가시키면 두 가지 효과가 발생한다. 첫 번째는 단면의 표면으로부터 열 침투 깊이 내의 유체의 부피가 증가되면 SPL(Sound Pressure Level)이 증가하며 두 번째는 스택 길이에 걸친 온도 경사를 감소시키면 SPL(Sound Pressure Level)이 감소된다. 본 연구에서는 스택의 길이를 증가시킴으로써 SPL(Sound Pressure Level)이 증가하였다.

Table 2 SPL measurements for different input voltage

	$V_{in}=6V$ 경우 SPL	$V_{in}=6.5V$ 경우 SPL
최대값	107.7	109.2
평균값	106	108.4

3.4 공진기 길이 대비 SPL

입력 전압을 동일하게 한 상태에서 길이 15cm 및 20cm의 2가지 열음향 시스템을 테스트 하였다. 두 시스템 모두 동일한 2.5cm 두께의 스택을 사용하였다. 실험을 통하여 공진기 길이가 길수록 큰 SPL(Sound Pressure Level)값을 가지는 것을 알 수 있었다.

열 음향 현상은 유체와 고체사이의 경계조건에 의해 조절된다. 시간 평균 SPL(Sound Pressure Level)의 발생은 유체와 고체 경계 사이의 압력 교란과 열 유속 상호작용에 대한 시간 평균 발생량의 적분에 비례한다. 더 긴 공진기는 스택의 표면적이 짧은 공진기의 표면적과 같을 지라도, 유체와 접촉하는 표면적이 더 크다. 이 초과된 표면적은 긴 공진기에서 더 높은 수준의 음압의 발생을 타당하게 하는 스택 효과를 제공한다.

3.5 입력 전기 대비 SPL

입력 전압에 따른 SPL(Sound Pressure Level)의 변화에 대하여 실험 하였다. 본 실험에서는 가변 저항과 15cm길이의 공진기를 사용하였다.

실험결과를 살펴보면 Table 2와 같이 입력전압의 증가는 더 높은 SPL(Sound Pressure Level)을 나타내었다. 이는 출력은 $\Gamma = \Delta T_m / \Delta T_{crit}$ 이므로 입력 전압의 증가로 더 높은 온도 변화가 생기므로 입력 전압은 스택에 걸쳐 더 높은 온도 구배를 발생시켰고 더 높은 음향 파워를 발생시킨다.

3.6 길이에 따른 주파수 측정

열음향 시스템을 이용하여 고주파 발생 원리에 대한 실험을 하였다. 실험에 사용된 1/4공진기는 정상파로써 음압 마디가 개구부에 있고 음압 파복이 폐쇄된 부분에 있기 때문에, 홀수 공진주파수를 발생시킨다. 공진주파수는 공진기 길이에 의존하며 근본적인 공진주파수는 다음과 같이 나타난다.

$$f_0 = a/\lambda \tag{3}$$

여기에서 a는 음속이며 λ 는 파장이다. 길이가 L

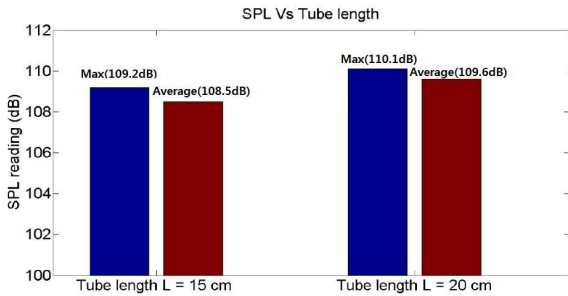


Fig. 11 SPL (max and average) vs tube length for stack length $l = 2.5$ cm

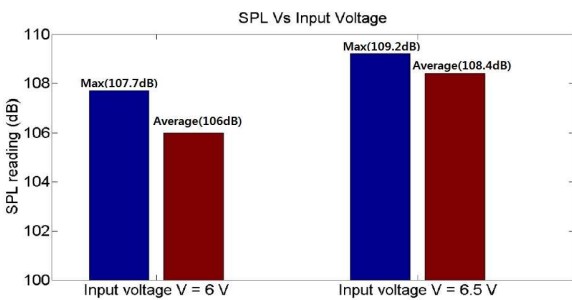


Fig. 12 SPL(max and average) vs Input Voltage

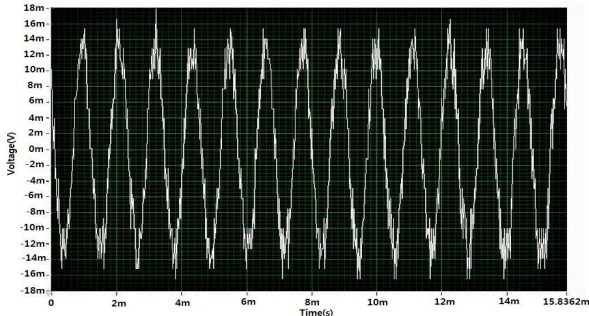


Fig. 13 Signal generated by 10 cm long thermoacoustic laser

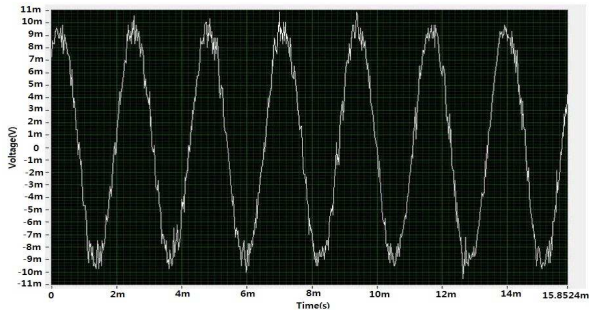


Fig. 14 Signal generated by 20 cm long thermoacoustic laser

인 1/4파장 공진기에서 λ 는 다음과 같이 나타난다.

$$\lambda = 4L \tag{4}$$

실험을 통하여 시스템에서 공진기의 길이를 줄임으로써 높은 주파수를 얻는다는 것을 알 수 있다.

근본적인 공진 주파수는 식 (3)에 의해 나타나며, 길이 L의 1/4 파장의 열음향 시스템에 대한 λ 는 식 (4)과 같이 나타난다.

길이가 2.5cm의 스택이 두 가지 열음향 시스템에 사용되었으며, 앞선 연구를 통해 얻은 스택 최적위치인 공진기의 폐쇄된 끝부분에서 L/4 - L/2 지점 사이에 스택을 위치시켰다. 10cm 길이의 열음향 시스템은 885Hz의 기본 주파수를 기록하였으며, 20cm길이는 437 Hz를 기록하였다. 실험을 통해 측정된 수치는 식 (3)과 (4)에서 얻은 이론적 수치(860Hz 및 430Hz)에 매우 근접하고 있었다. 두 열음향 레이저에 대한 파형과 주파수 그래프는 Fig. 13 및 Fig. 14로 나타난다.

Kwon. Y. S.는 2kHz와 25kHz사이의 주파수에서 작동하는 고주파 열음향 레이저에 대해 연구하였으며, 소리를 만들어내기 위해서는 더 큰 온도변화가 필요하다는 것을 알았다.⁽⁸⁾ 주어진 온도 차와 주어진 공진기의 파장에 대한 진동을 설정하기 위한 최대의 스택 길이는 다음과 같이 나타난다.

$$\nabla X_{\max} \approx \frac{\lambda \nabla T}{T_m \tan\left(\frac{x}{\lambda}\right)} \tag{5}$$

여기에서 λ 는 열음향 레이저의 파장이며, ∇T 는 스택 양 끝의 온도 차이이다. Kwon. Y. S는 주어진 열음향 레이저 파장과 스택에 걸친 온도의 차이에 있어 스택길이 ∇x 가 ∇X_{\max} 보다 작을 경우에만 열음향 시스템이 작동한다는 것을 알았다.

4. 결 론

본 논문에서는 열음향 시스템의 기하학적 구조에 대한 파라미터를 변화시키면서 최대 SPL(Sound Pressure Level)과 고주파 발생조건을 파악하였다. 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 스택 위치에 대한 SPL(Sound Pressure Level) 값에 대해서는 공진기의 폐쇄된 끝에서 L/4 - L/2 지점 사이에 스택을 위치시킬 때의 최대 SPL(Sound Pressure Level)이 발생하였다. 이론적으로 L/2위치에서 최대 SPL(Sound Pressure Level)을 가지나 실험에서 보여주듯이 L/4 - L/2 사이에서

최대 SPL(Sound Pressure Level)이 발생하는 것을 알 수 있다.

(2) 여러 방향 (0° , 45° , 그리고 90°)에서의 SPL(Sound Pressure Level)측정은 미세한 차이만 나타나며 생성된 음파가 구면파일 수도 있다는 가정을 확인해주었다. 또한 SPL(Sound Pressure Level)미터와 공진기와의 거리가 증가하면 SPL(Sound Pressure Level)값이 감소하였다.

(3) 스택길이에 대한 SPL(Sound Pressure Level)값의 변화는 스택의 길이가 증가하면 SPL(Sound Pressure Level)값이 증가되었다. 스택의 길이가 증가하면 유체의 부피가 증가하고 스택 길이의 증가로 스택 표면으로부터 열침투 깊이 내의 유체의 부피가 증가하여 SPL(Sound Pressure Level)값도 증가한다.

(4) 공진기 길이에 대한 SPL(Sound Pressure Level)값은 열음향 현상 자체가 유체와 고체사이의 경계조건에 의해 발생하는데 공진기의 길이가 길어질 경우 스택의 표면적과 같더라도 유체의 접촉면적이 크기 때문에 공진기의 길이가 길어질수록 SPL(Sound Pressure Level)값이 증가하였다.

(5) 입력전압에 따른 SPL(Sound Pressure Level)값의 변화 역시 더 높은 전압을 입력할수록 SPL(Sound Pressure Level)값은 증가하였다. 이는 출력은 $\Gamma = \Delta T_m / \Delta T_{crit}$ 이므로 입력전압의 증가로 더 높은 온도구배가 생기기 때문이다

(6) 열음향 시스템을 이용하여 공진기 길이에 따른 주파수 측정에서는 공진기의 길이가 20cm에서 열음향 레이저가 437Hz의 음파를 발생되었고 10cm 길이의 열 음향 레이저에서는 885 Hz의 음파가 발생되었다. 즉 공진기의 길이가 짧아질수록 더 높은 주파수를 생성하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (과제번호: 2011-0029820)

참고문헌

- (1) Feldman, K.T., Jr., 1968, "A Study of Heat Generated Pressure Oscillations in a Closed End Pipe," Ph.D. Dissertaton, Mechanical Engineering, University of Missouri.
- (2) Feldman, K.T., Jr., 1968, "Review of the Literature on Sondhauss Thermoacoustic Phenomena," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.7, No.1, pp. 71~82
- (3) Ijani, M.E.H., Zeegers, J.C.H. and de Waele, a. T. a. M., 2002, "The Optimal Stack Spacing for Thermoacoustic Refrigeration," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 112, No. 1, p. 128.
- (4) Symko, O., 2004, "Design and Development of High-Frequency Thermoacoustic Engines for Thermal Management in Microelectronics," *Microelectronics Journal*, Vol.35, No.2, pp.185~191.
- (5) Symko, O.G., 2006, "Acoustic approach to Thermal Management: Miniature Thermoacoustic Engines," *Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems*, pp.771~776, IThERM 2006.
- (6) Kim, Y.T. and Kim, M.G., 2000, "Optimum Positions of a Stack in a Thermoacoustic Heat Pump," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol.36, No.5, pp. 279~286.
- (7) Swift, G., 1988, "Thermoacoustic Engines.," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.84, No.4, pp. 1145~1180.
- (8) Kwon, Y. S., 1996, "Study of Thermoacoustic Engines Operating at Frequencies between 2 KHz and 25 KHz," Ph.D. dissertation, Department of Physics, The University of Utah.