

## 열음향 스택의 길이와 전압 변화에 따른 주파수와 온도 변화에 대한 고찰

이상엽<sup>1</sup>, 김종근<sup>2</sup>, 정하나<sup>2</sup>, 이상준<sup>3</sup>

<sup>1</sup>앤츠이엔씨(주) 과장, <sup>2</sup>앤츠이엔씨(주) 대리, <sup>3</sup>앤츠이엔씨(주) 대표

## A Study on the Frequency and Temperature Variation with the Length and Voltage of Thermoacoustic Stack

Sangyeub Lee<sup>1</sup>, Chonggun Kim<sup>2</sup>, Hana Jung<sup>2</sup>, and Sangjun Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Section Manager, ANTS E&C Inc.

<sup>2</sup>Assistant Manager, ANTS E&C Inc.

<sup>3</sup>President, ANTS E&C Inc.

<sup>3</sup>Corresponding author: sang-jun@antsenc.com

Received June 4, 2021; Revised July 19, 2021; Accepted July 29, 2021

### ABSTRACT

세계적으로 화석연료 사용에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 증가로 인한 기후변화로 인하여 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 여러 분야의 신재생에너지 기술이 발달하고, 그에 대한 연구가 진행되고 있으며, 열음향 시스템에 대한 기술적 연구는 꾸준히 진행중이다. 열음향 시스템은 엔진, 펌프, 냉장 및 냉동기, 레이저 등 다양한 분야에 이용이 가능하며, 압축기와 같은 기계를 필요로 하지 않기 때문에 비교적 구조가 간단하기 때문에 에너지 손실을 줄일 수 있다. 열음향파 발생장치를 구성하여 공진기의 직경과 길이는 고정된 상태에서 스택의 길이와 공급 전압을 변화시킨 후 발생하는 주파수와 dB, 온도를 측정하였으며 이에 변화를 확인하였다. 실험 결과 스택의 길이와 공급하는 전압의 변화는 발생하는 열음향파의 주파수 변화에는 영향이 없는 것으로 확인하였으며, 공급하는 전압이 커질수록 dB로 증가하는 것을 확인하였다. 또한 스택의 길이에 따라서 발생하는 온도차이에 의하여 스택의 길이가 길어질수록 열음향파의 발생 시간이 증가함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 실험결과를 활용하여 열음향파의 기초 데이터 자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Global interest in renewable energy is increasing due to climate change caused by increased CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel use. As a result, renewable energy technology in various fields is developing, research is underway on it, and technical research on thermal acoustic systems is steadily underway. Thermoacoustic systems are available in various fields such as engines, pumps, refrigerators and refrigerators, and lasers, and do not require machines such as compressors, which can reduce energy loss because of its relatively simple structure. In this work, we conduct experiments on the length of the stack of thermoacoustic waves and the effect of the voltage supplied on the frequency, dB, and temperature differences before and after the stack. A thermosound wave generating device was constructed to measure the frequency, dB, and temperature generated by varying the length and supply voltage of the stack while the diameter and length of the resonator were fixed. Experiments show that changes in the length of the stack and the voltage supplied have no effect on the frequency changes of the thermosound wave, and that the voltage supplied increases to dB as the voltage supplied increases. It was also confirmed that the longer the stack is, the longer the length of the stack, the more time the thermal acoustic wave occurs. Using these experimental results, it is believed that it can be used as basic data for thermal acoustic waves.

**Keywords:** Thermo-acoustic wave, Thermo-acoustic, Frequency variation, Thermo-acoustic system



## 1. 서론

세계적으로 화석연료 사용에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량 증가로 인한 기후변화와 원자력발전소의 안전 문제로 인하여 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며<sup>[1]</sup>, 장차 고갈되고 있는 화석연료를 대신하고 미래에 충분한 에너지원의 확보를 위하여 매우 중요한 자원이다<sup>[2]</sup>. 이에 여러 분야의 신재생에너지 기술이 발달하고, 그에 대한 연구가 진행되고 있다. 그 중 열음향(Thermo-acoustics) 시스템에 대한 기술적 연구는 꾸준히 진행되고 있다.

열음향파(Thermo-acoustics wave)는 열(heat)이나 음(sound)에 의하여 생성되는 음향파의 거동특성을 연구하는 음향학(acoustics)의 한 분야로 분류된다. 이러한 열음향 이론 및 현상의 이해는 근본적으로 열역학 및 유체역학 원리와 기본 방정식에 기반을 두고 있다. 일정 공간에 놓인 유체를 급속히 가열하거나 화학반응이 일어나는 혼합과정 중의 경계면 근처에서 유체가 급격히 팽창하는 경우 고온부에서 저온부로 열이 흐르면서 압력파가 발생하는데<sup>[3]</sup>, 이렇게 열적인 영향으로 유발되는 압력파를 일반적으로 열음향파라 한다. 이렇게 발생한 열음향파는 음속으로 전파되면서 동시에 에너지를 전달하며, 열과 점성 소산(viscous dissipation)의 영향으로 인하여 점진적으로 그 강도가 감소하여 소멸하게 된다<sup>[4]</sup>.

열음향 시스템은 엔진, 펌프, 냉장 및 냉동기, 레이저 등 다양한 분야에 이용이 가능하며, 압축기와 같은 기계를 필요로 하지 않기 때문에 비교적 구조가 간단하기 때문에 에너지 손실을 줄일 수 있다<sup>[5]</sup>. 또한 태양열과 폐열 등을 사용하여 발전할 수 있기 때문에 버려지는 열원에 대한 재사용을 함으로써 친환경적이다<sup>[6]</sup>. 열음향 시스템은 불활성 가스를 작동 매체로 사용하며, 열음향 기술을 지속 가능하고 환경 친화적인 방식으로 기계적 또는 전기적, 냉각 전력 및 가열이 가능하다<sup>[7]</sup>. 열음향 시스템에서 발생하는 주파수의 세기를 조절하여 특정 주파수를 갖는 열음향파를 발생시킬 수 있기 때문에 원하는 주파수를 발생시켜 의료, 설비 진단, 엔진, 냉장 및 냉동기 등 다양한 산업에 이용이 가능하다<sup>[8]</sup>.

이와 같이 열음향 현상에 대한 연구는 비교적 오랜 역사를 가지고 있으나 초기에는 응용분야의 제한으로 많은 연구자들의 관심을 받지 못하였으며, 주로 현상에 대한 관찰과 이해를 목적으로 진행되었다. 1975년 Merki 등의 정밀한 실험을 통해 균일한 온도 분포를 갖는 원통관 내에 정상파가 존재하는 경우, 원통의 벽면을 따라 열이 이동하는 현상이 측정되었으며, 이들은 열이 입자속도가 큰 부위에서 인접한 음압 최대부위로 전달되는 것을 발견하였다. 열음향 원리는 1977년 Putnam 등이 큰 관내의 열음향 효과를 분석한 이래 Rijke tube, Sondhauss tube 등으로 발전되어 왔으며, 최근 Wheatley 등이 스피커를 이용한 공명관식 열음향 냉동기를 제작하여 실험에 성공함에 따라 이후 실용화 연구로 전환되었다<sup>[9]</sup>. 국내의 경우 구분기가 공명관의 적판 내에서 음파가 진행할 때의 속도·음압 및 온도의 분포상태를 해석적으로 구하였으며, 김동혁은 적판의 길이, 작동 유체의 평균압력 등이 성능에 미치는 영향을 관찰하였다<sup>[10]</sup>. 아직까지 열음향 시스템을 이용한 냉동기의 경우 기존의 증기압축식 냉동기에 비해 효율이 극히 떨어지고 있으며, 효율개선에 대한 많은 연구 과제를 안고 있다. 현재는 열음향 냉각 및 냉동시스템, 열기관을 대체하는 열음향 엔진, 열음향 압축기, 연소 및 열전달 시스템의 효율 및 안정성 향상, 센서 활용, 시스템 진단 등 제한된 분야에서만 열음향 시스템을 사용하지만 향후 많은 연구를 통하여 효과적인 에너지변환시스템으로 다양한 분야에서 사용될 것으로 기대된다.

기존 연구 내용을 살펴보면 음압 발생에 관한 기본 특성분석이 주를 이루고 있지만, 본 연구에서는 기존 연구에서의 열음향파 발생을 위한 구조를 참고하여 제작하고, 열음향파가 발생하는 조건에서 스택의 길이와 공급하는 전압의 조건을 변경함으로써 발생하는 음향 주파수와 스택 전후의 온도 발생의 변화를 분석하였다. 이러한 연구 결과는 학술적인 측면에서 열음향파의 물리적 특성을 평가할 수 있는 실험 데이터 및 가시화 자료의 확보 및 열음향 흐름을 이용한 시스템의 열전달 및 효율 향상 연구를 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 배경 이론 및 실험방법

### 2.1 배경 이론

#### 2.1.1 열음향

소리(음파)는 매질의 밀도의 떨림이 전달되는 것으로 매질이 기체인 경우 밀도의 떨림은 바로 압력과 온도의 떨림이 된다. 유체 속을 통과하는 음파는 단열과정을 이행하는데, 이 때 음파가 진행하는 방향으로 유체의 압력이 주기적으로 변화함에 따라 유체의 온도가 미세하게 변화한다. 인간의 일상 대화에서도 음파에 따른 온도의 변화가 있으나 대화에 의해 발생하는 공기 중의 온도 진폭은 0.0001도 정도의 매우 적은 크기를 가지고 있어 거의 느끼지 못한다<sup>11)</sup>. 그러나 음파의 진행방향으로 얇은 판을 설치하면 유체와 판의 열전달로 인해 열침투깊이에 걸쳐 온도의 위상차가 발생하게 되며, 위상차의 변화가 유체와 판의 경계면 사이에서 순수한 열유동과 함께 일유동을 유발하고 이를 이용한 것을 열음향파라고 한다. 공진기는 관 형상을 하고 있으며 내부에서 매질의 진동을 유지시키는 역할을 한다. 열침투깊이  $\delta_k$ 는 음의 주기  $T=1/f$ 와 비슷한 시간 동안 열이 확산되는 거리를 나타내며 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다<sup>12)</sup>. 침투 깊이를 설명하는 기본 이론은 1885년에 헤비사이드가 자신이 만든 전자파 이론을 이용하여 제안하였다<sup>13)</sup>.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho C_D}} \quad (1)$$

#### 2.1.2 열음향 사이클

소리는 음파의 형태로 전파되는 파동이기 때문에 전파 시 매질의 진동을 유발한다. 따라서 대기 중에는 전파되면 기체집단이 진행방향으로 진동하게 되는데 이로 인해 같은 공간 내에서 기체집단이 최대로 모이는 지점과 흩어지는 지점이 생기게 된다. 이 두 지점은 각각 기체집단이 단열 압축하는 지점, 단열 팽창하는 지점으로 온도의 변화를 유도하게 된다. 열음향파 발생기의 스택 표면에서 거동하는 기체입자들은 2개의 단열과정(isentropic process)과 2개의 등압과정(isobaric process)으로 구성되는 브레이튼 사이클을 형성한다<sup>8)</sup>.

#### 2.1.3 스택(Stack) 내 에너지 흐름

스택은 공진기 내부의 냉매와 판의 상호작용으로 온도구배를 형성시키는 열음향파 발생기의 핵심부품이다<sup>14)</sup>. 스택에서의 에너지 흐름은 스택에 형성되는 온도구배에 의해 발생하는 열전도에 의한 흐름, 열음향 효과에 의한 열펌핑 에너지의 흐름, 그리고 음향에너지에 의한 일유동이다. 스택은 열유속이 집중되어 있는 열침투깊이 부근의 영역에서 매질과의 접촉면을 넓혀주는 역할을 하며, 재질의 열용량을 고려하여 결정한다. 공진기 내에서 스택의 위치는 온도구배, 열유속 및 성적계수(Coefficient Of Performance, COP)에 커다란 영향을 미치는데, 열유속은 음압의 마디와 배에서 0이 되므로 이 부분을 피해야 한다<sup>15)</sup>.

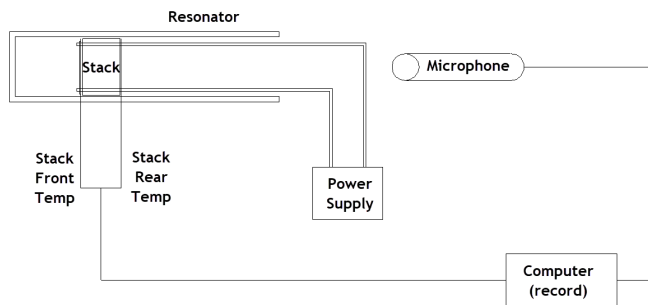
스택 단면에 열을 공급할 때, 그 사이에 흐르는 유체에 의해 압축과 팽창의 단계가 관찰된다. 유체가 음향주파수를 가진 변환기에서 진동할 경우, 음파와 스택과 공진기의 접촉단면에서의 단열팽창과 유체압축에 의해 유체의 온도에 변화가 생긴다. 유체와 단면 사이의 열전달은 낮기 때문에 유체온도를 순간적으로 변화시키지는 않는다. 대신 유체와 단면사이의 열전달은 열역학 사이클을 통해 유체를 움직이는데 필요한 온도, 압력 및 동작 간에 시간차를 만들어 낸다. 따라서 유체와 단면 사이의 비가역적 열전달이 열음향파를 발생시킨다.

### 2.1.4 공진기 내부의 공진

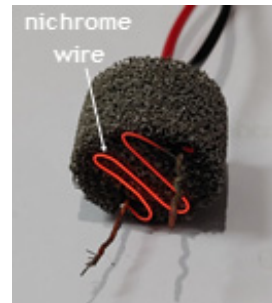
공진관에서 발생하는 기본 주파수(fundamental frequency)는  $a/4L$ 에 비례한다. 여기서  $a$ 는 음속,  $L$ 은 공진관의 길이이며, 이는 1/4파장 공진기(quarter-wave resonator)와 같은 음향장 형태가 공진관 내부에서 발생한다<sup>[16]</sup>. 열음향 현상에 대한 초창기 연구를 수행한 Sprenger에 의하면 공진관 내부의 압력섭동세기(intensity of oscillations)는 주변 압력 대비 노즐 내부 전압( $p_0/p_a$ ), 공진관 내경 대비 노즐 출구 내경( $d_n/d_r$ ), 노즐 출구 내경 대비 노즐과 공진관 간격( $X/d_n$ ), 공진관 내경 대비 공진관 길이( $L/d_r$ ), 그리고 그 외 열전달 등에 의한 에너지 손실 요소에 영향을 받는다고 보고하였다. 또한 열 발생은 노즐과 공진관의 축 정렬도 영향을 받는다고 보고하였다<sup>[17]</sup>.

## 2.2 실험방법

앞서 관련 연구에서 기술한 선행연구 자료를 종합 분석한 결과, 열적으로 기인한 열음향 현상에 관한 실험적 연구는 주로 공진기 길이와 스택 위치에 따라 발생하는 열음향파의 SPL값을 측정하는 연구 위주로 수행되어 왔음을 알 수 있다. 선행 실험적 연구를 참고하여 열음향파 발생기를 Fig. 1(a)와 같이 구성하였으며, 열음향파 발생기를 구성하는 주요 요소로는 공진기와 스택, power supply로 구성되어있다. 기존 실험에서는 공급 전력, 스택의 채널 수, 공진기 내에서의 스택의 위치에 따른 음압에 대한 결과값을 주로 이루고 있으며<sup>[18-20]</sup>, 본 논문에서는 기존 실험적 연구에서 구성한 열음향파 발생기의 기하학적 구조를 유지하면서, 열음향파 발생기에서 발생하는 음압뿐만 아니라 주파수 측정과 스택의 전후에서의 온도에도 초점을 맞추어서 실험하였다.



(a) Thermo-acoustic wave schematic



(b) Thermo-acoustic wave experiment stack

Fig. 1. Thermo-acoustic wave schematic and experiment stack

열음향파의 발생기에서 공진기의 길이와 스택의 위치는 동일하게 설정한 후, Table 1과 같이 스택의 길이와 공급하는 전압을 변경하여 실험하였다. 공진기는 유리(파이렉스) 재질로 내경은 22mm, 외경은 25.6mm(두께 1.8mm), 길이는 100mm로 제작하였다. 스택의 위치는 공진기의 막힌 부분부터 25mm로 고정하였다. 전압의 경우 Toyotech 사의 DP30-03A를 사용하여 6V, 9V, 12V로 공급하였다. 음압과 주파수 측정은 G.R.A.S 사의 Microphone을 사용하였으며, 발생한 열음향파를 분석하기 위한 스펙트럼 분석 소프트웨어는 AREVA의 01dB Software를 이용하여 측정·분석하였다. 온도의 경우 Radionode사의 Tapaculo Lite를 사용하여 2초 단위로 측정·기록하였다. 실험장비로는 한쪽 끝이 막혀있는 공진기와 공진기 내부에서 단열 및 음향 임피던스의 역할을 수행하는 스택, 그리고 가열 부분에 열을 발생시키기 위한 직경 0.3mm의 니크롬선과 파워 서플라이 리드선을 연결하여 구성하였다. Thermocouple wire T Type을 사용하여 스택의 전면과 후면부에 설치하였다. 스택의 경우 Alantum 사의 NiFeCrAl 재질을 사용하였으며, 직경은 21mm, Cell Size는 1200 $\mu$ m이다. 실험실의 조건은 내부온도 21.9°C, 습도는 64%에서 발생하는 열음향파를 측정하였다.

**Table 1.** Thermo-acoustic wave experiment variable

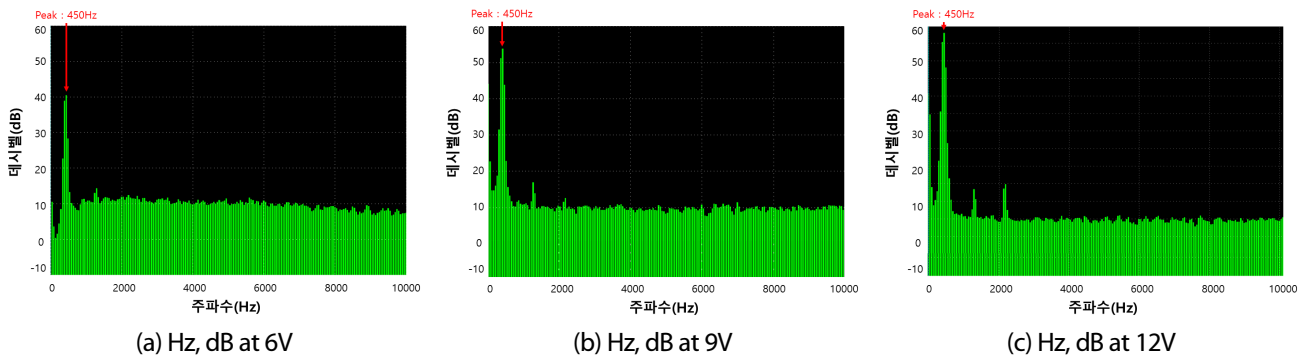
	스택의 길이	공급 전압	공진기 길이	공진기 외경	공진기 내경	공진기 두께	스택의 위치
Case 1	7mm	6V	100mm	25.6mm	22mm	1.8mm	25mm
Case 2		9V					
Case 3		12V					
Case 4	14mm	6V					
Case 5		9V					
Case 6		12V					

본 실험에서는 스택의 길이와 공급하는 전압이 발생하는 열음향파에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 스택의 길이는 7mm, 14mm 두 가지로 설정하였으며, 스택의 앞면에 직경 0.3mm의 니크롬선으로 열선을 접촉시키고, 이를 Power supply와 연결한다. 스택을 공진기의 막혀있는 위치에서 25mm 떨어진 위치에서 위치시킨다. 이때, 측정기의 Microphone은 공진기의 축과 동일선상으로 정렬시키고<sup>[21]</sup>, 공진기의 열려있는 위치에서 500mm 떨어진 위치에서 Microphone을 위치시켜 주파수와 음압을 측정한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 스택의 길이와 전압에 따른 Hz와 dB

실험 결과, Figs. 2, 3에서 보이는 것과 같이 열음향파가 발생할 때 측정되는 Hz의 Peak 포인트의 변화는 없으나, Peak 포인트에서 발생하는 dB의 변화가 나타났다. 주파수의 경우 제공하는 전압이나, 스택의 길이에 상관없이 모든 실험에서는 450Hz의 주파수에서 dB이 발생하였다. 반면 공급하는 전압의 세기가 증가할수록 450Hz에서 발생하는 dB의 크기 또한 증가함을 볼 수 있다. 이는 니크롬선의 열용량의 넘어선 에너지가 발생함에 있어서, 전압이 클수록 더 많은 에너지를 발산함에 dB이 커지는 것으로 판단된다. 또한 스택의 길이가 길어짐에 따라 dB이 감소하는데, 이는 스택의 길이가 길수록 열침투깊이가 길어짐에 따라서 전력의 밀도가 감소하고, 이에 dB이 감소하는 것으로 사료된다. 따라서 스택의 길이는 주파수변화에 영향을 미치지 않으며, 제공하는 전압 및 스택의 길이는 발생하는 dB에 영향을 미치는 것으로 사료된다.



**Fig. 2.** Hz and dB measurement with voltage change in 7mm stack

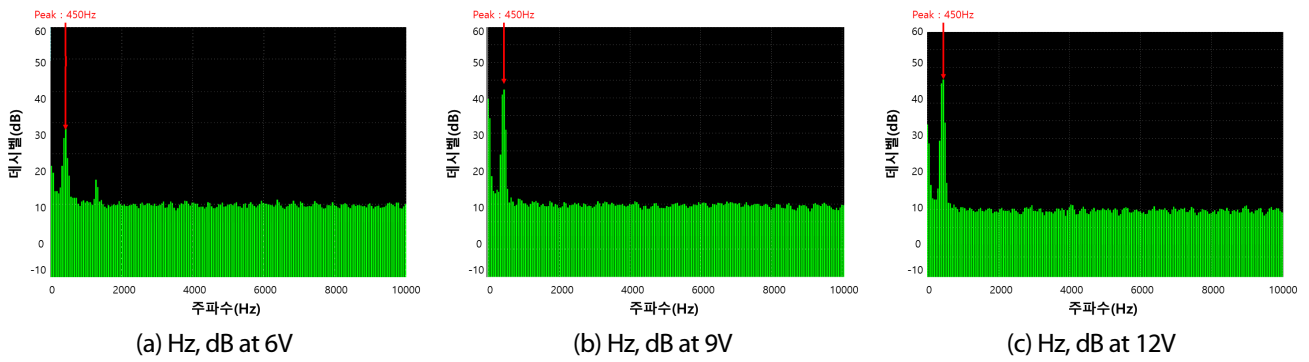


Fig. 3. Hz and dB measurement with voltage change in 14mm stack

### 3.2 스택의 길이와 전압에 따른 온도차이

Fig. 4에서 보이는 것과 같이 전원을 공급하였을 때, 스택의 전면부에서 먼저 온도가 상승한 후 이어 스택의 후면부에서도 온도가 상승함을 보였다. 약 15°C의 온도차이가 발생하였을 때, 열음향파가 발생하였으며, case1의 경우 스택의 전면부와 후면부의 온도 차이가 약 70°C에서 수렴할 때 열음향파가 발생하지 않았다. Fig. 5에서는 스택의 길이가 2배로 됨에 따라서 스택의 전면부와 후면부의 온도차이가 커지며, 열음향파가 발생하는 지속시간이 더 길다는 것을 확인하였다. 이는 Fourier's law of heat conduction( $dT/dx$ )에 의해<sup>[22]</sup> 스택의 길이( $dx$ )가 증가함에 따라서 스택전후의 온도차이( $dT$ )가 더 크게 발생한 것으로 판단되며, 온도차이가 오래 유지됨에 따라서 열음향파의 발생시간이 7mm의 스택에서 발생한 시간보다 14mm 스택에서 오래 유지된 것으로 사료된다.

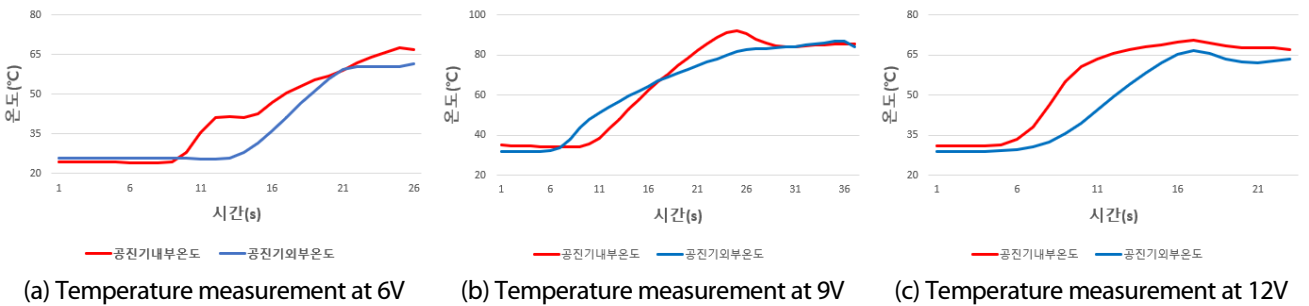


Fig. 4. Temperature measurement before and after stack on 7mm stack

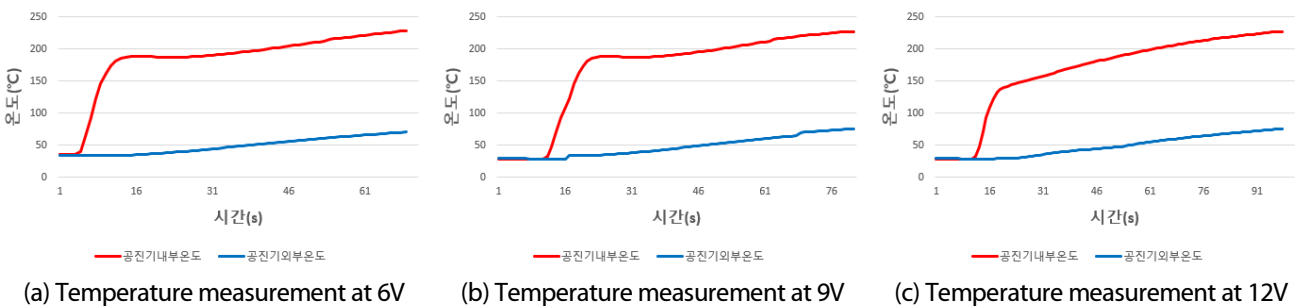


Fig. 5. Temperature measurement before and after stack on 14mm stack

열음향파 실험을 위와 같이 실시하였으며, 결과 값은 Table 2와 같은 결과가 나왔다.  $T_{in}$ ,  $T_{out}$ 의 경우 열음향파가 발생한 시점에서 스택 전후의 온도를 기록하였다. 공진기 전압에 따라 발생하는 dB을 입력하여 Fig. 6과 같이 추세선(red dotted line)을 나타내었다. 이로 인하여 열음향파 발생 시의 전압과 dB 사이의 관계식을 도출하였으며, 관계식은 다음 식 (2), (3)과 같다. 각 스택과 전압에 따라 발생하는 dB 값을 입력한 후 세 점의 데이터를 통하여 2차 방정식의 형태로 관계식을 추론하였다.

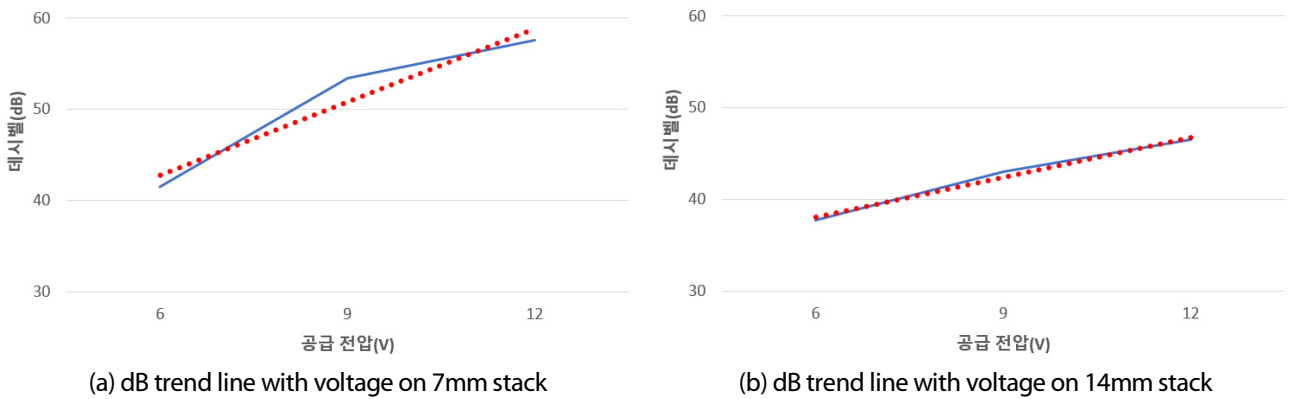
$$7\text{mm stack} : dB = 2.683 V + 25.402 \tag{2}$$

$$14\text{mm stack} : dB = 1.45 V + 29.1 \tag{3}$$

위의 결과를 통해 스택 길이와 공급전압에 따른 dB을 예측할 수 있다.

**Table 2.** Result of thermo-acoustic wave experiment

Experiment			Test result			
Case	Stack length (mm)	Supply voltage (V)	dB (A)	Hz	$T_{in}$ (°C)	$T_{out}$ (°C)
Case 1	7.0	6.0	41.5	450	41.4	25.9
Case 2	7.0	9.0	53.4	450	48.0	35.7
Case 3	7.0	12.0	57.6	450	46.0	32.3
Case 4	14.0	6.0	37.8	450	122.3	33.3
Case 5	14.0	9.0	43.0	450	125.1	33.9
Case 6	14.0	12.0	46.5	450	122.9	28.8



**Fig. 6.** dB trend line according to stack length and voltage

#### 4. 결론

본 연구에서는 열음향파 발생기에서의 스택의 길이와 제공하는 전압이 발생하는 열음향파의 주파수, 음압과 온도에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 공진기의 길이는 100mm를 사용하였으며, 이전 연구를 참고하여 공진기 내의 스택의 위치를 L/4지점에 위치시켰다. 이 때 스택의 한쪽 면은 니크롬선을 이용하여 가열하였으며, 한쪽 면은 자연대류에 의해

냉각을 진행하였다. 이에 스택의 가열면과 가열하지 않는 면에 대해서 온도측정을 진행하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

스택의 길이와 제공하는 전압은 열음향파 발생기에서 발생하는 열음향파의 주파수(Hz) 변화에는 영향을 미치지 않으며, 제공하는 전압을 증가할수록 높은 dB의 열음향파를 발생시킬 수 있었다. 이에 각 스택의 길이에 따른 전압과 dB 사이의 관계식을 정립하였다. 또한, 스택의 길이가 길어질수록 스택 전후의 온도구배가 커지는 것을 확인하였으며, 이는 니크롬선에서 발생한 열이 스택을 지나오면서 열적 손실이 발생한다는 것을 알 수 있다.

본 연구를 통해 열음향파 주파수를 생성하기 위한 기초 데이터로 활용될 것이고, 폐열을 열원으로 활용하여 새로운 신재생에너지 분야로 활용될 것으로 사료된다. 또한 열음향파 발생기의 구조, 스택 및 공진기의 재질과 길이를 변화시킴으로써 효율을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

※ 본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 ‘국토교통기술촉진연구사업’의 “Thermo-acoustic wave, solid carbon dioxide를 활용한 안개 소산 장치 개발(과제번호 21CTAP-C157767-02)” 과제에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

1. 진상현, 한준, “신·재생에너지의 개념 및 정책적 타당성에 관한 연구”, 한국정책학회보, 제18권 제1호, pp.187-208, 2009.
2. 김원섭, 김종만, “신재생에너지 대전력 마이크로파 발생 장치 개발과 연구”, 한국에너지학회 추계학술발표회, pp.192-192, 2020.
3. 오승진, 이윤준, 신상용, 임상훈, 천원기, “열음향(Thermoacoustic) 레이저의 음향파 특성 분석”, 한국태양에너지학회 논문집, 제31권 제6호, pp.1-7, 2011.
4. 황인주, “압축성 유체의 급속가열에 기인한 열음향파의 생성과 열전달”, 박사학위 졸업논문.
5. 김남진, “열음향 레이저의 공명튜브와 스택 변화에 따른 음파특성”, 기계저널, 제58권 제12호, pp.47-51, 2018.
6. 신상용, 오승진, 이윤준, 김남진, 천원기, “열음향파 발생장치의 최적 작동 조건에 대한 실험적 연구”, 대한기계학회논문집 B 권, 제37권 제2호, pp.131-137, 2013.
7. M. E. H. Tijani, and S. Spoelstra, “A High Performance Thermoacoustic Engine”, Journal of Applied Physics, Vol. 110, No. 9, 093519, 2011.
8. 박성식, 천원기, 김남진, “스택의 채널 수에 따른 열음향파의 특성 비교 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, 제33권 제4호, pp.8-14, 2013.
9. 이남길, 신완순, 우삼용, 박종호, “열음향 냉동효과에 관한 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp.85-90, 1997.
10. 김동혁, “공명관식 열음향 냉동기의 최적설계를 위한 수치모사 및 설계인자 분석”, 설비공학논문집, 제7권 제2호, pp.329-340, 1995.
11. 오상훈, “밀폐관형 스피커구동 열음향 냉동기의 주파수 및 온도변화 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2003.
12. 김이삭, 이종주, “소리 에너지를 이용한 소형냉동기 모델에 대한 연구”, 전국과학전람회.
13. C. M. Donaghy-Spargo, “On Heaviside’s Contributions to Transmission Line Theory: Waves, Diffusion and Energy Flux”, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 376, No. 2134, 2018.
14. A. T. A. M. de Waele, “Basic Operation of Cryocoolers and Related Thermal Machines”, Journal of Low Temperature Physics, Vol. 164, No. 5-6, pp. 179-236, 2011.
15. G. Swift, and S. L. Garrett, “Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators”, The Journal of the



Acoustical Society of America, Vol. 113, No. 5, 2003.

16. 서성현, 강상훈, 배종열, 이진영, “열음향 공진 점화에 대한 연구”, 한국추진공학회지, 제20권 제1호, pp.82-89, 2016.
17. H. S. Sprenger, “Uber Termische Effecte bei Rezonanzrohren”, Mitteilungs aus dem Institut fur Aerodynamik, No. 21, pp. 18-35, 1954.
18. 신상웅, 오승진, 이윤준, 김남진, 천원기, “열음향(Thermoacoustic) 레이저의 음향주파수 특성 분석”, 한국태양에너지학회 추계 학술발표대회 논문집, pp.331-336, 2012.
19. 오승진, 오원중, 이윤준, Kuan Chen, 천원기, “태양열 적용 열음향레이저 설계 및 제작”, 한국에너지학회 춘계학술발표회, pp.246-246, 2010.
20. I. Paek, “Performance Characterization of Thermoacoustic Cooler Components and Systems”, Doctor of Philosophy, 2005.
21. 박성식, 오승진, 천원기, 김남진, “태양에너지 이용을 위한 열음향파의 음압 특성 비교 연구”, 한국태양에너지학회 추계학술발표대회 논문집, pp.325-330, 2012.
22. T. Ohara, “Molecular-Scale View of Heat Conduction in Liquides, Soft Matters, and Their Interfaces”, 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회 논문집, pp.3-6, 2019.