

## 태양열 적용을 위한 열음향 레이저의 특성 비교 연구

박성식\*, 안응진\*\*, 오승진\*\*\*, 천원기\*\*\*\*, 김남진\*\*\*\*\*

\*제주대학교 에너지공학과(pss5153@jejunu.ac.kr), \*\*제주대학교 에너지공학과(anej515@jejunu.ac.kr)  
\*\*\*제주대학교 에너지공학과(osj2558@jejunu.ac.kr), \*\*\*\*제주대학교 에너지공학과(wgchun@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*\*제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

### A Comparative Study on the Characteristics of Thermoacoustic Laser for Applying Solar Energy

Park, Sung-Seek\* An, Eoung-Jin\*\* Oh, Seung-Jin\*\*\* Chun, Won-Gee\*\*\*\* Kim, Nam-Jin\*\*\*\*\*

\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(pss5153@jejunu.ac.kr),  
\*\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(anej515@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(osj2558@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(wgchun@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(jnkim@jejunu.ac.kr)

#### Abstract

The conversion of solar energy into acoustic waves is experimentally studied. Measurements were made on the Sound Pressure Level (SPL), frequency, onset time and the temperature gradient across the stack. A pyrex resonance tube is used with a honey-comb structure ceramic stack along with Ni-Cr and Cu wires. An AL1 acoustical analyzer was used to measure the SPL and frequency of acoustic waves whereas K-type thermocouples were hired to estimate temperature gradients. For a resonance tube of 100mm, no acoustic waves were generated with a power input of 25W. By increasing its length to 200mm, however, maximum SPLs of 96.4 dB, 106.3 dB and 112.8 dB were detected for the tubes of 10mm, 20mm and 30mm in IDs and their respective stack positions of 70mm, 60mm and 50mm from the closed end.

Keywords : 열음향파(Thermal acoustic waves), 공명튜브(Resonance tube), 스택(Stack), 주파수(Frequency), 음압레벨(Sound pressure level)

#### 1. 서 론

차세대 에너지관련 핵심기술로 기대되고 있는 열음향(Thermoacoustic)은 태양열 및

폐열과 같은 재생 가능한 에너지를 열원으로 사용할 수 있으며, 고온부에서 저온부로 열이 흐르면서 열에너지를 소리에너지로 변환시키는 신개념 열변환 시스템이다. 열음향 시스템은

투고일자 : 2012년 3월 6일, 심사일자 : 2012년 3월 7일, 게재확정일자 : 2012년 4월 24일  
교신저자 : 김남진(jnkim@jejunu.ac.kr)

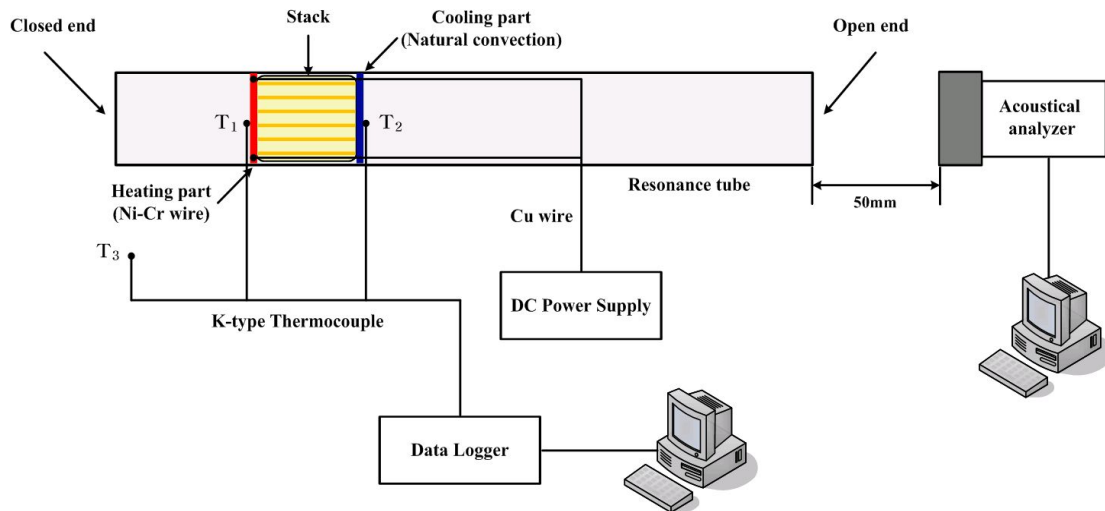


그림 1. 열음향 레이저(열 음향파) 실험장치 개략도

엔진, 펌프, 냉장 및 냉동기, 레이저 등 다양한 분야에 이용이 가능하며, 압축기와 같은 기계를 필요로 하지 않기 때문에 비교적 구조가 간단하고, 각종 소음 및 기기의 진동을 제거할 수 있으며, 시스템의 수명 연장 및 부품을 단순화시킬 수 있다.<sup>1)2)</sup>

특히, 열음향 레이저(열 음향파)는 음향파를 발생시키는 공명튜브의 형상에 따라 특정 주파수를 갖는 음향파를 발생시킬 수 있으며, 발생하는 음향파는 압축과와 같은 충격과를 발생시켜 결석 분쇄 및 종양 제거와 같은 의학과 관련된 분야에 적용시킬 수 있다. 또한 음향파의 주파수를 증가시켜 초음파로 이용할 수 있고, 압전기(Piezoelectric)와 같은 음향전원변환기에 적용할 경우 전기를 생산할 수 있기 때문에 열음향 레이저 대한 많은 연구가 이루어졌다.<sup>3)</sup>

Ryan Lampe는 공명튜브 내부 스택(Stack)의 형상을 변화시켜 열음향 레이저의 성능실험을 수행하였고, 평행, 나선, 핀 형태의 스택을 사용하였을 때보다 사각 형태의 채널을 가지고 있는 벌집형태(Honey-comb type)의 스택을 사용하였을 때, 열음향 레이저의 성능이 우수하다고 보고하였다.<sup>4)</sup> 특히, Kohei Hotta

et al.<sup>5)</sup>은 130mm의 소형 프로토 타입 열음향 시스템을 이용하여 660Hz의 주파수를 갖는 레이저를 성공적으로 발생시켰으며, O. G. Symko et. al.<sup>6)</sup>은 열음향 시스템에 3cm의 압전소자를 설치하여 7.4V의 전기를 생산하였다. 또한 Kuan Chen et al.<sup>7)</sup>은 두 개의 동일한 열음향 레이저 시스템의 각도를 변화시켜 발생하는 음향파와 음향에너지의 위상과 주파수 특성을 분석하였다. 하지만 아직까지 열음향 레이저 시스템에 대한 연구는 발생하는 음향파의 현상분석에 관련된 실험이 주를 이루고 있으며, 공명튜브 및 스택의 형상에 따른 음향파의 발생시간, 주파수, 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 태양에너지를 열원으로 사용하는 고효율 열음향 레이저의 개발을 위하여 음향파를 발생시키는 공명튜브의 내경과 길이 그리고 튜브내의 온도구배를 증가시켜 음향 임피던스 역할을 수행하는 스택의 길이와 공급전력에 따른 열음향 레이저의 발생시간 및 온도구배, 음압, 주파수 측정실험을 수행하여 열음향 레이저에서 발생하는 정상파(Standing wave)의 발생 현상과 특성을 비교분석 하였다.

## 2. 실험장치

그림 1은 본 실험에서 사용된 열음향 레이저 발생장치의 개략도이다. 실험장치는 한쪽 끝이 막혀 있으며,  $v/4L$  ( $v$ :음파속도,  $L$ :길이)의 기본 진동수 음향파를 발생시키는 공명튜브와 튜브 내부에서 단열 및 음향 임피던스의 역할을 수행하는 스택, 가열부분에 열을 발생시키기 위한 니크롬선과 구리선으로 구성되어 있다. 그림 2에 온도센서와 니크롬선, 구리선으로 구성된 스택을 나타내었고, 그림 3에 본 연구에서 사용된 공명튜브를 나타내었다.

전력을 공급해주기 위한 DC power supply는 전압과 전류를 125 V, 8 A까지 증가시킬 수 있어 최대 750 W의 전력을 공급 할 수 있는 다우 나노텍의 DAP-125를 사용하였다. 또한, 열음향 레이저에서 발생되는 음향파의 특성을 분석하기 위하여 음압레벨 측정 범위가 30 - 130 dB이고, 주파수의 측정 범위가 10 Hz - 20 kHz인 NTI audio사의 AL1 Acoustilyzer 음향파 분석기를 사용하였다. 온도측정을 위해 총 3개의 K-타입 온도센서를 사용하였으며, 공명튜브 외부와 스택의 가열면과 냉각면에 각각 설치하였다. 또한 실험시작 1분 이내에 가열면의 온도가 200°C 이상 증가하기 때문에 공명튜브는 고온에 강한 Pyrex 재질을 사용하였고, 스택은 벌집형태의 세라믹 재질을 사용하였다. 측정된 실험데이터의 수집과 저장을 위해 Agilent 34970A 데이터 로거와 컴퓨터를 설치하였으며, NTI audio사의 MiniLINK software program과 Agilent사의 BenchLink Data Logger program을 이용하여 효과적으로 데이터를 수집하였다.

## 3. 실험방법 및 결과

### 3.1 공명튜브의 형상과 스택의 위치에 따른 열음향 레이저 측정

본 실험에서는 공명튜브의 형상과 스택의 위치에 따른 음향파의 특성을 비교분석하기

위하여 열음향 레이저 발생실험을 수행하였다. 스택의 길이와 공급전력은 25 mm, 25 W로 고정하였다. 공명튜브의 형상과 스택의

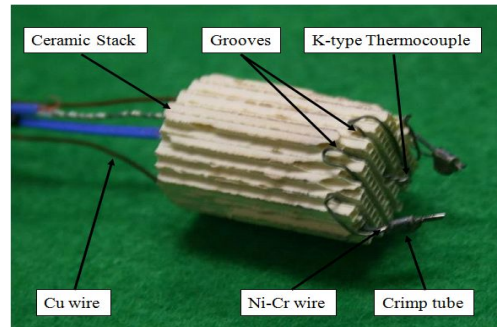


그림 2. 벌집형태의 세라믹 스택

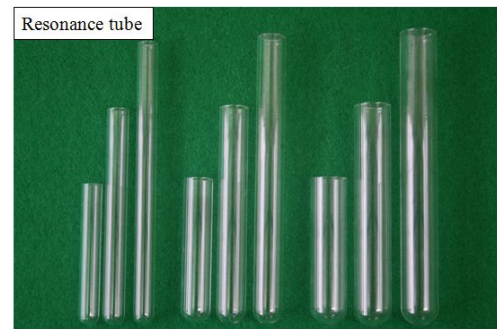


그림 3. Pyrex 공명튜브

표 1. 공명튜브의 길이 및 내경 변화

Inside diameter (mm)	Length (mm)	Stack position(cm)
10, 15, 20	100	1, 2, 3, 4, 5
	150	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
	200	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15

위치는 표 1에 나타난 것과 같이 튜브의 내경을 10 ~ 20 mm, 길이를 100 ~ 200 mm로 변화시키면서 스택의 위치에 따른 열음향 레이저의 특성을 분석하였다. 스택의 위치는 튜브의 단면 면에서 1 ~ 15 cm로 변화시켰으

며, 음압레벨과 주파수, 음향파 발생시간은 음향파 분석기를 통하여 1초 간격으로 측정하였고, 공명튜브내의 가열부와 냉각부 온도도 마찬가지로 데이터 로거를 이용하여 1초마다 측정하고 음향파가 발생했을 때의 온도구배를 계산하였다. 열음향 레이저 시스템에서 발생하는 음향파는 대부분 1분 이내에 발생하기 때문에 모든 실험은 3분 동안 진행하였으며, 3분이 지나도 음향파가 발생하지 않을 경우에는 음향파가 발생되지 않은 것으로 판단하고 실험을 종료하였다.

그림 4는 길이 100 mm의 공명튜브에서 스택의 위치에 따른 음압레벨을 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공명튜브 내경 10, 15, 20 mm에서 모두 음향파가 발생되지 않음을 알 수 있었다. 이는 스택의 길이에 비해 공명튜브의 길이가 충분히 길지 않기 때문에 가열면과 냉각면의 열교환기 역할을 담당하는 스택이 제대로 그 기능을 수행하지 못하며, 튜브의 냉각이 효율적으로 이루어지지 않기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5는 길이 150 mm의 공명튜브에서 튜브의 내경과 스택의 위치에 따른 음압레벨을 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공명튜브 내경 10 mm에서는 스택의 위치가 튜브의 닫힌 면에서 6 cm 지점에서만 음향파가 발생하였으며, 내경 15 mm에서는 5, 6 cm 지점에서, 내경 20 mm에서는 4 ~ 8 cm 사이의 지점에서 음향파가 발생함을 확인하였다. 발생하는 평균음압레벨은 스택의 위치에 따라 변화함을 알 수 있었고, 주파수는 음향파가 발생한 모든 구간에서 동일하게 630 Hz가 발생되었다. 또한 같은 길이의 공명튜브에서 발생하는 음향파의 평균음압레벨은 튜브의 내경이 작아질수록 감소하며, 음향파가 발생하는 구간도 줄어들음을 알 수 있었다. 이는 공명튜브의 내경이 작아질수록 스택의 채널을 통해 발생하는 열음향 레이저의 음파와 공명튜브의 정규 진동수와 일치하는 구간이 줄어든다는 것을 의미한다.

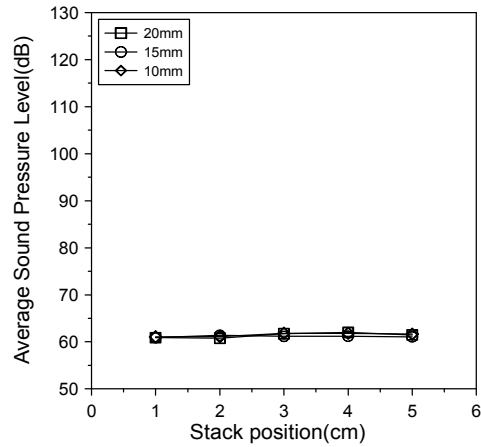


그림 4. 100 mm 공명튜브에서 스택의 위치에 따른 음압

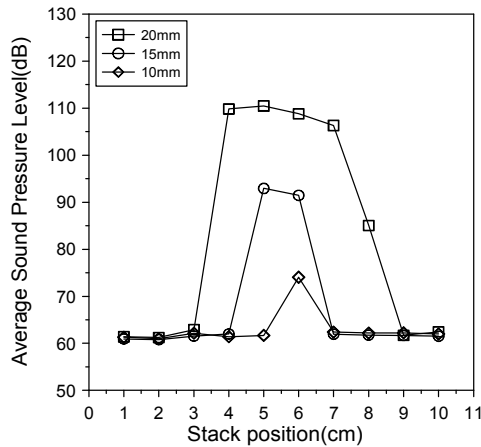


그림 5. 150 mm 공명튜브에서 스택의 위치에 따른 음압

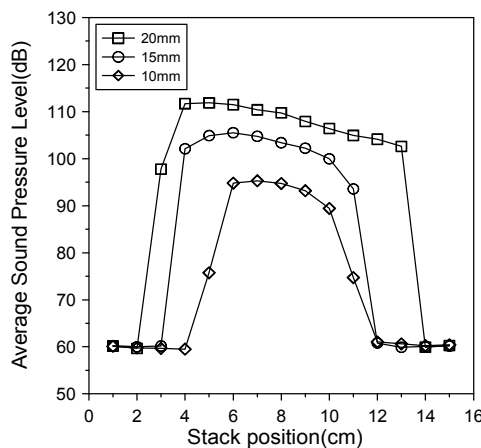


그림 6. 200 mm 공명튜브에서 스택의 위치에 따른 음압

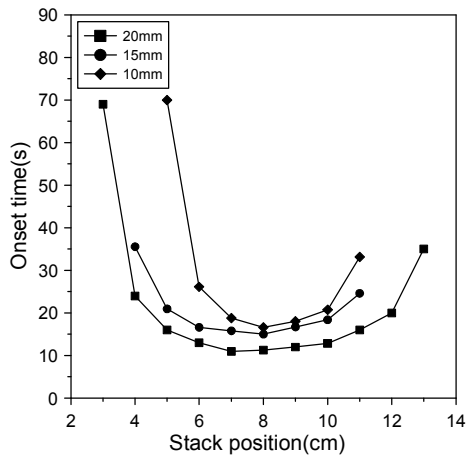


그림 7. 공명튜브의 내경과 스택의 위치에 따른 음향파 발생시간

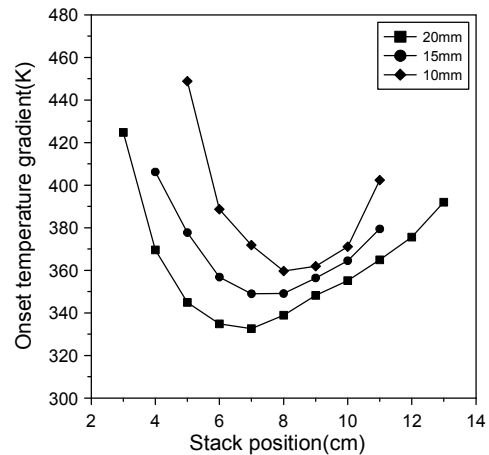


그림 8. 공명튜브의 내경과 스택의 위치에 따른 음향파 발생온도구배

그림 6은 길이 200 mm의 공명튜브에서 튜브의 내경과 스택의 위치에 따른 음압레벨을 비교하여 나타낸 그래프이다. 음향파가 발생하는 구간은 공명튜브 내경 10, 15, 20 mm에서 각각 5 ~ 11 cm, 4 ~ 11 cm, 3 ~ 13 cm임을 확인하였으며, 150 mm의 공명튜브에서와 마찬가지로 음향파의 발생구간과 평균음압레벨은 튜브의 내경과 스택의 위치에 따라 달라진다는 것을 알 수 있었다. 열음향 레이저가 발생된 모든 구간에서 측정된 음향파의 주파수는 500 Hz로 동일하였다. 또한 내경 10, 15, 20 mm의 공명튜브에서 평균음압레벨이 가장 높은 스택의 위치는 튜브의 단면에서 각각 7 cm, 6 cm, 5 cm임을 확인하였고, 이 때의 평균음압레벨은 각각 95.3 dB, 105.5 dB, 111.8 dB이며, 최고음압레벨은 96.4 dB, 106.3 dB, 112.8 dB임을 알 수 있었다. 따라서 공명튜브의 내경이 10, 15, 20 mm으로 증가할수록 최고음압레벨을 발생시키는 스택의 위치가 1 cm씩 감소한다는 사실을 알 수 있었으며, 이와 같은 실험결과는 태양에너지를 열원으로 사용하는 열음향 시스템의 개발에 있어서 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

그림 7은 길이 200 mm의 공명튜브에서 스택의 위치에 따른 음향파 발생시간을 비교하

여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 음향파 발생시간이 가장 짧은 스택의 위치는 내경 10, 15, 20 mm에서 8 cm, 8 cm, 7 cm이고, 이 때 음향파 발생시간은 각각 16초, 15초, 11초임을 확인하였으며, 공명튜브의 내경이 증가함에 따라 음향파 발생시간이 짧아진다는 것을 알 수 있었다. 최대음압을 발생시키는 스택의 위치는 7 cm, 6 cm, 5 cm 지점이지만 최소발생시간은 다른 지점에서 나타난다는 결과를 통하여 음압의 크기와 발생시간은 상관관계가 적다는 것을 알 수 있다. 이는 스택의 위치에 따라 최적의 열전달 속도를 나타내는 지점과 점성 및 열적 손실의 영향이 최대로 미치는 지점이 다르기 때문이며, 이와 같은 실험결과는 G. W. Swift<sup>8)</sup>가 보고한 내용과 일치한다.

그림 8은 길이 200 mm의 공명튜브에서 음향파가 발생했을 때 스택의 가열부와 냉각부의 온도구배를 튜브의 내경에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공명튜브의 내경과 스택의 위치에 따른 음향파 발생온도구배의 경향은 그림 7의 음향파 발생시간 그래프와 유사한 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 튜브의 내경이 증가함에 따라 음향파 발생온도구배는 감소

함을 알 수 있었다. 또한 스택의 위치가 튜브의 닫힌 면과 열린 면에 가까워질수록 발생온도구배가 증가한다는 사실을 알 수 있다. 발생온도구배가 가장 낮은 스택의 위치는 내경 10, 15, 20 mm에서 8 cm, 6 cm, 7 cm이고, 이때 음향파와 발생온도구배는 각각 359.60 K, 356.84 K, 332.66 K임을 확인하였으며, 이와 같은 실험결과로 음압의 세기뿐만 아니라 음향파의 발생에도 공명튜브의 형상과 스택의 위치가 중요하게 작용한다는 사실을 알 수 있었다.

### 3.2 공명튜브의 형상과 스택의 길이에 따른 열음향 레이지 측정

본 실험에서는 공명튜브의 내경과 스택의 길이에 따른 음향파의 특성을 비교분석하였다. 공명튜브의 내경을 10 ~ 20 mm로 변화시켰으며, 스택의 길이는 25 mm를 기준으로 50 ~ 200 %로 길이비율을 변화시켰다. 본 실험에 사용된 스택의 길이변화를 표 2에 나타내었다. 공명튜브의 길이와 공급전력은 200 mm, 25 W로 고정하였으며, 스택의 위치는 각각의 공명튜브에서 최대음압이 발생되었던 위치인 7 cm, 6 cm, 5 cm로 고정하였다.

그림 9는 공명튜브의 내경과 스택의 길이에 따른 음압을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 스택의 길이가 변화함에 따라 평균음압레벨이 변화함을 확인할 수 있으며, 내경 10 mm의 공명튜브에서는 스택의 길이가 200%일 때 음향파가 발생되지 않음을 알 수 있었다. 평균음압레벨은 모든 공명튜브에서 스택의 길이가 100%, 25mm일 때 가장 높게 측정되었고, 스택의 길이 100%를 기준으로 스택의 길이가 짧아지거나 커질수록 평균음압레벨이 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 또한 음향파의 주파수는 스택의 길이를 변화시켰을 경우에도 500 Hz로 일정하게 발생되었다.

### 3.3 공명튜브의 형상과 공급전력에 따른 열음향 레이지 측정

표 2. 스택의 길이 변화

diameter (mm)	length rate(%)	Stack length(mm)
9, 14, 19	50	12.5
	100	25
	150	37.5
	200	50

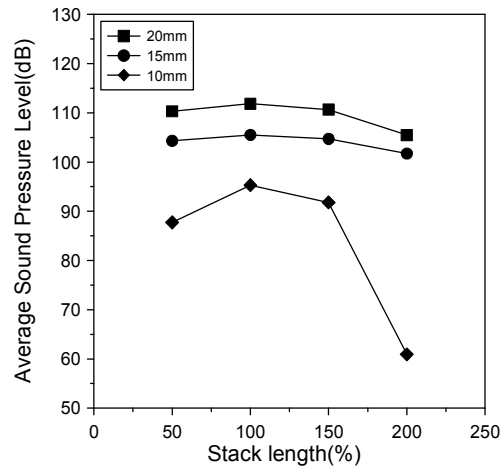


그림 9. 공명튜브의 내경과 스택의 길이에 따른 음압

본 실험에서는 공명튜브와 스택의 길이를 200 mm, 25 mm로 고정하고 공명튜브의 내경과 공급전력에 따른 열음향 레이지 실험을 수행하였다. 먼저 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력을 알아보기 위하여 공급전력을 0 W에서부터 1 W씩 증가시키면서 공명튜브의 내경에 따른 최소공급전력을 측정하였으며, 최소공급전력을 측정 한 후에는 공급전력을 20, 25, 30, 35 W로 변화시키면서 음향파의 특성을 비교분석하였다.

그림 10은 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력을 공명튜브의 내경에 따라 비교하

여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공명튜브의 내경이 증가할수록 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 감소하며, 발생하는 음향파의 평균음압레벨은 증가

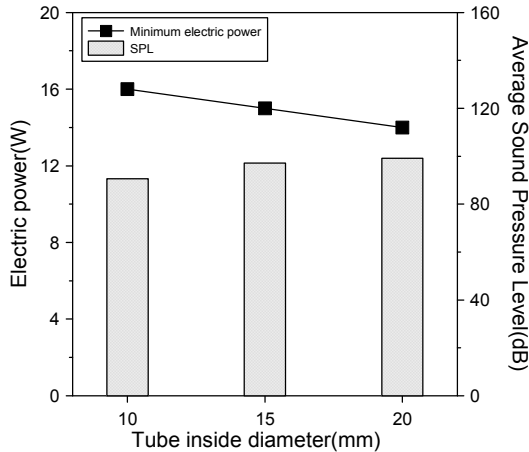


그림 10. 음향파가 발생할 수 있는 최소공급전력과 음압

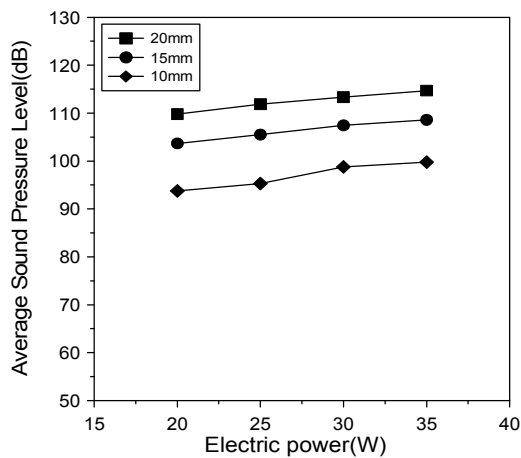


그림 11. 공명튜브의 내경과 공급전력에 따른 음압

한다는 것을 알 수 있다. 주파수는 동일하게 500 Hz로 측정되었으며, 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 내경 10, 15, 20 mm에서 각각 16 W, 15 W, 14 W이고, 이 때의 평균음압레벨은 90.52 dB, 97.16 dB, 99.20 dB로 측정되었다. 이는 공명튜브의 내경이 증가할수록 음향파를 발생하는데 필요한 열에너

지가 감소하며, 음향파의 음압레벨은 증가한다는 것을 의미한다.

그림 11은 공급전력을 20 ~ 35 W로 증가시키면서 측정한 음향파의 평균음압레벨을 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공급전력이 증가할수록 평균음압레벨도 증가한다는 것을 알 수 있다. 하지만 공급전력이 20, 25, 30, 35 W일 때, 튜브 내경 20mm에서의 평균음압레벨 증가량은 2.05 dB, 1.48 dB, 1.36 dB로 음압 증가량은 공급전력이 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 일정하게 공급 전력을 증가시켜도 발생하는 음압은 이에 비례하여 증가하지 않으며, 이와 같은 실험결과는 공급전력의 크기를 너무 크게 증가시키면 공급전력에 비례한 열음향 레이저 시스템의 효율은 오히려 떨어진다는 것을 의미한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 공명튜브의 형상과 스택의 길이 및 공급전력에 따른 열음향 레이저 발생실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

- (1) 공명튜브의 길이와 내경이 커질수록 음향파가 발생하는 구간은 증가한다는 것을 알 수 있었고, 음향파가 발생한 모든 구간에서 측정된 주파수는 길이 150 mm의 공명튜브인 경우 630 Hz, 길이 200 mm의 공명튜브인 경우 500 Hz임을 알 수 있었다.
- (2) 길이 200 mm, 내경 10, 15, 20 mm의 공명튜브에서 평균음압레벨이 가장 높은 스택의 위치는 튜브의 단면에서 각각 7 cm, 6 cm, 5 cm임을 확인하였고, 이 때의 평균음압레벨은 각각 95.3 dB, 105.5 dB, 111.8 dB임을 알 수 있었다.
- (3) 음향파 발생시간이 가장 짧은 스택의 위치는 내경 10, 15, 20 mm에서 8 cm, 8 cm, 7 cm이고, 이 때 음향파 발생시간은 각각 16초, 15초, 11초임을 확인하였으며, 공명

튜브의 내경이 증가함에 따라 음향파 발생시간과 음향파 발생온도구배는 감소함을 알 수 있었다.

- (4) 공명튜브의 내경과 스택의 길이에 따른 음압을 비교한 결과 내경 10 mm에서는 스택의 길이가 200%일 때 음향파가 발생되지 않았으며, 모든 공명튜브에서 스택의 길이가 100%, 25mm일 때 평균음압레벨이 가장 높음을 알 수 있었다.
- (5) 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 길이 200 mm, 내경 10, 15, 20 mm의 공명튜브에서 각각 16 W, 15 W, 14 W이며 튜브의 내경이 증가할수록 음향파를 발생시키는 필요한 전력이 감소함을 알 수 있었다. 또한 공급전력이 20, 25, 30, 35 W 일 때, 튜브 내경 20mm에서의 평균음압 증가량은 2.05 dB, 1.48 dB, 1.36 dB로 음압 증가량은 공급전력이 증가함에 따라 감소한다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NO. 20110092786)

## 참 고 문 헌

1. G. W. Swift, Thermoacoustic Engines and Refrigerators, Physics Today, No. 7, Vol. 48, pp. 22-28, 1995.
2. S. Backhaus and G. W. Swift, A thermo-acoustic Stirling heat engine, Nature, vol. 399, pp.335-338, 1999.
3. O. G. Symko, Using sound to turn heat into electricity, News Center, University of Utah, 2007
4. Ryne Lampe, Design and Testing of Rapid Prototyped Stacks for thermo acoustic Applications, Proceedings of The National Conference, April 12-14, pp. 1-8. 2008
5. Kohei Hotta et al., A prototype of small-size and self-oscillate thermo acoustic system, IEEE International Ultrasonics Symposium Proceeding, ULTSYM, 2009
6. O. G. Symko et. al., Acoustic approach to thermal management, Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 12th IEEE Intersociety Conference, 2010
7. Kuan Chen et. al., Acoustic energy output and coupling effect of a pair of thermoacoustic lasers, International Journal of Energy Research, DOI:10.1002 /er.1806, 2011
8. G. W. Swift, 2002, Thermoacoustics-A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators, Acoustical Society of America, pp. 1-300, 2002