

## 열음향(Thermoacoustic) 레이저의 음향과 특성 분석

오승진\*, kuan Chen\*\*, 이윤준\*\*\*, 신상웅\*\*\*\*, 임상훈\*\*\*\*\*, 천원기\*\*\*\*\*

\*제주대학교 에너지공학과(osj2558@jejunu.ac.kr), \*\*유타대학교 기계공학과(chen@mech.utah.edu),  
\*\*\*제주대학교 에너지공학과(leeyj@jejunu.ac.kr), \*\*\*\*제주대학교 에너지공학과(04se07@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*\*한국에너지기술연구원(shlim@kier.re.kr), \*\*\*\*\*제주대학교 에너지공학과(wgchun@jejunu.ac.kr)

### The Analysis of Acoustic Waves generated by a TA(ThermoAcoustic) Laser Pair

Oh, Seung-Jin\* Kuan Chen\*\* Lee, Yoon-Joon\*\*\* Shin, Sang-Woong\*\*\*\*  
Lim, Sang-Hoon\*\*\*\*\* Chun, Won-gee\*\*\*\*\*

\*Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University(osj2558@jejunu.ac.kr),  
\*\*Dept. of Mechanical Engineering, University of Utah(chen@mech.utah.edu),  
\*\*\*Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University(leeyj@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University(04se07@jejunu.ac.kr),  
\*\*\*\*\*Korea Institute of Energy Research(shlim@kier.re.kr),  
\*\*\*\*\*Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University(wgchun@jejunu.ac.kr)

#### Abstract

Sound waves and acoustic energy generated by two identical TA (ThermoAcoustic) lasers were analyzed and studied. One end of the ceramic stack was heated by a thin NiCr wire wound around that end. The other end of the stack was cooled by natural convection of atmospheric air. The wavelength of the sound waves generated by a single TA laser was four times the tube length and the amplitude of the waves increased with the heating rate. SPL (Sound Pressure Level) meters and microphones were employed to measure and study the sound waves at different distances from the glass tube opening and at the focusing point of the TA laser pair for different laser position arrangements. The sound waves of the two TA lasers at the focusing point were found to be almost 180 degrees out of phase when the openings of the two lasers were very close to each other and the angle between the laser axes was small. When the two TA lasers were placed far apart, the sound wave amplitudes and the phase difference between the two laser outputs varied periodically with time. The frequencies of the sound waves changed when the openings of the two TA lasers were in close vicinity and the angle between the laser axes exceeded a certain value. In this case, the glass tube opening was no longer a pressure anti-node and the wavelength of the fundamental mode was not equal to four times the tube length.

Keywords : 음향에너지(acoustic energy), 포커싱 과 동기화(focusing and synchronization), 위상차(phase difference), 음파(sound wave), 열음향레이저(thermoacoustic laser pair)

투고일자 : 2011년 7월 26일, 심사일자 : 2011년 8월 5일, 게재확정일자 : 2011년 12월 5일  
교신저자 : 천원기(wgchun@jejunu.ac.kr)

## 1. 서 론

열기관이란 열을 일로 또는 일을 열로 바꾸는 기관을 말한다. 열기관에는 크게 열엔진과 열펌프의 두 종류가 있는데 전자는 고온부에서 저온부로 열이 흐르면서 엔진을 가동시켜 일을 발생시키는 기관을 말하며, 후자는 엔진에 일을 가해 저온부에서 고온부로 열이 역류하게 하는 기관이다. 열음향(ThermoAcoustic) 기관이란 일반적인 열기관에서 일의 역할을 음파가 대신하는 열기관을 말한다. 즉, 열음향 엔진은 고온부에서 저온부로 열이 흐르면서 음파를 발생시키는 장치이며, 열음향 펌프는 음파를 가해 열이 저온부에서 고온부로 역류하게 하는 장치를 말한다. 열음향 레이저는 열음향엔진과 같은 원리로 작동하는 장치이며 가청주파수(20kHz) 이상의 초음파를 발생시키는 장치를 말한다.

높은 주파수와 진폭을 갖는 음향파를 발생시키기 위하여 다양한 구조의 열음향기관들이 제작 되었으며 열원을 공급하기 위하여 여러 형태의 입력에너지도 연구되어 왔다[1-12]. 태양에너지를 열원으로 사용하는 열음향레이저의 경우 발생 음향파의 파장은 공명기 길이의 4배이고 그 세기가 1m 거리에서 120dB의 음향파를 발생시킨다[4]. 최근 유타대학교의 Symko 교수는 그의 연구에서 수kHz범위의 열음향 레이저를 개발 하였다[10].

본 연구에서는 두 개의 동일한 열음향 레이저를 제작하여 이들로부터 발생하는 음향파와 음향에너지의 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

열음향(TA) 레이저를 구성하는 주요 요소로는 공명기(Resonator), 열교환기(Hot and Cold Heat exchanger), 스택(Stack)으로 구분된다. 공명기는 스택에서 발생된 음향파가 정상파(Standing wave)를 형성하기 위해서 필요하

다. 이때 생성된 정상파의 파장은 튜브길이의 4배( $\lambda=4L$ ) 이다.

본 연구에서 공명기는 직경 2.2cm, 길이 19.5cm의 한쪽 끝이 막힌 파이렉스 유리관을 사용하였고 수정된 존트하우스 튜브[5]와 비슷한 형상을 하고 있다.  $v/4L$ ( $v$ :음파속도,  $L$ :공명기의 길이)의 기본 진동수를 가지며 열린 끝은 발생된 음향파가 공기로 전파 및 확산되기 시작하는 지점으로 구형파의 중심 이다.

스택은 열음향 발생장치에서 가장 중요한 요소로써 리제너레이터, 단열재 그리고 음향 임피던스 역할을 수행하며 스택의 양쪽 면은 각각 열교환기 기능을 이행한다. 스택의 재질은 열전도율이 낮은 세라믹이 사용되었으며 수많은 직사각형 채널을 갖고 있는 벌집구조의 원기둥 형태이며, 직경과 길이는 각각 2.5cm이다. 스택의 한쪽 면을 3~4줄의 홈을 파내어 26-gauge(0.4mm)의 니크롬선을 구부려서 끼워 넣고 가장자리의 두 채널을 통해 두 개의 24-gauge(0.5mm)의 구리선을 통과시켜 니크롬선과 연결하였다. 구리선에 전원공급기를 연결하여 니크롬선을 가열해줌으로써 스택의 한쪽 면에 고온의 열을 공급해 주었다. 반면, 스택의 다른 한 면은 별도의 냉각장치를 연결하지 않고 주변 공기의 복사와 대류에 의해 냉각을 시켜 주었다.

한쪽 끝이 닫히고 다른 쪽 끝이 열린 공명기에서는 음속이 최대가 되는 지점이 가장 효과적인 스택의 위치이며 이 위치는 닫힌 면에서 1/3 지점임을 Donald Fahey는 자신의 연구에서 나타내었다[5]. Bess HE et al.의 실험에서는 공명기의 1/2~1/4 지점이 스택의 최적 위치라고 설명하였다[2]. G. W. Swift는 자신의 저서에서  $v$ (입자의 속도)를 낮게 유지 하여 점성 손실을 감소시키는 것(고효율)과 입자의 속도를 높게 하여 출력을 증가시키는 것(고출력)을 합리적으로 조합하여야 하며 닫힌 면에서 약  $\lambda/20$  지점에 위치시키면 된다고 밝혀내었다[11].

Bass HE et al의 실험에서는 공명기 출구가 위로 향하여 수직으로 위치하였을 경우 대류가 활발히 이루어져 스택 양단의 온도차가 증가하는 사실이 입증 되었다[2]. 본 연구에서는 공명기 출구에서의 용이한 음향파와 음압의 측정을 위하여 수평으로 설치하여 실험을 수행하였다.

각각의 TA 레이저에 열을 공급하기 위하여 12V DC 파워 서플라이를 사용하였고 니크롬선에 걸리는 전압차를 조정하기 위하여 가변저항을 직렬로 연결하였다.

발생된 음향파의 세기는 공명기의 출구를 벗어나가는 순간부터 거리에 따라 급격하게 약해진다. 이 발생된 음향파를 세척, 음식물 혹은 재료가공에 사용되기 위해서는 공명기 출구를 작업 면에 매우 근접하게 설치해야 한다. 하지만 대면적을 갖는 고체가 공명기의 출구에 근접할 경우 발생된 음향파가 이 표면에 반사 되어 공명기 안의 정상파 형성에 영향을 끼치게 된다. 공명기 출구의 상당 부분이 막히게 될 경우 압력 배(anti-node)가 압력 마디(node)로 바뀌면서 음향파는 소멸할 수 있다. 본 연구에서 일반적인 마이크를 공명기의 출구에 가까이 놓았을 때 이 현상이 관찰 되었다.

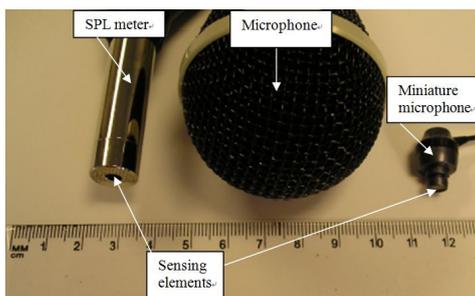


그림 1. SPL미터 와 소형 마이크로 폰.

이러한 이유로 TA 레이저의 출구 부근에서의 음향파를 측정하기 위하여 음향감지 센서가 대략 0.3cm 정도의 소형 마이크로폰을 사용하였다. SPL(Sound Pressure Level) 미

터도 직경이 12mm 의 음향센서가 장착되어 있다. 그림 1은 SPL 미터, 일반적인 마이크, 소형 마이크로폰을 보여주고 있다.

TA 레이저에서 발생된 음향파가 일정한 압력 하에서 외부 공기로 확산되면 공명기 출구는 공기입자 변위의 마디(node)가 되고 압력진동의 배(anti-node)가 된다. 그림 2는 공명기 안에서의 음향파와 시간에 따른 공기입자의 변위 와 압력 변화의 개념을 보여주고 있다.

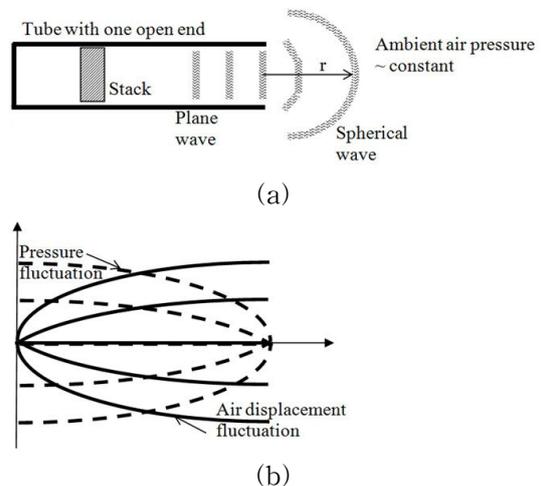


그림 2. TA레이저의 공명기 안 과 밖에서의 음향파 (a), 기본진동모드에서의 공기입자 변위와 압력 변위 변동(b).

공명기 안에서의 음향파는 공명기 축에 수직방향으로 진행되는 평면파와 거의 흡사하다. 출구에서부터 이 음향파는 평면파에서 구형파로 변한다. 공명기의 출구가 이 구형파의 중심이며 세기는  $1/r^2$  으로 감소한다. 여기서  $r$ 은 공명기 출구로부터의 거리이다.

동일한 크기의 공명기를 갖는 TA 레이저에서 발생하는 정상파의 파장과 주파수는 거의 일치한다. 이유는 파장과 주파수는 주로 공명기의 길이에 의존하기 때문이다. 반면에 진폭은 스택의 위치, 스택에 공급된 에너지, 스택에 발생된 온도구배에 의존한다.

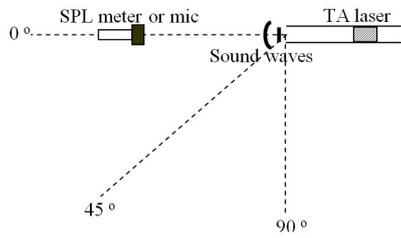


그림 3. 0°, 45°, 90°에서의 음압레벨 측정 위치.

그림 3은 TA레이저의 출구에서 세 방향에서의 음압측정을 위한 음압레벨 측정기의 측정 각도를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 음향 센서들은 모두 무지향성으로 전후좌우 상하 모든 방향의 음에 대해 같은 감도를 지니고 있다. SPL 미터와 마이크로폰의 음향 감지 부분을 TA레이저에서 발생하는 구형파와 평행하게 배치하여 측정하였다.

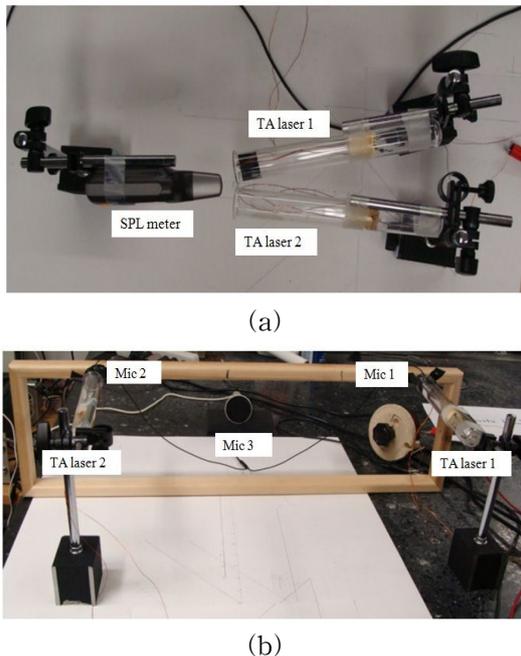


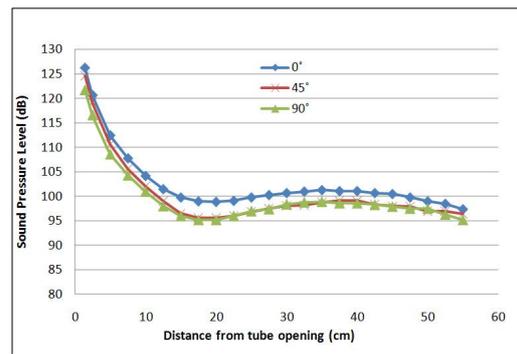
그림 4. 실험조건에 따른 TA레이저 배치 방법: (a) 두 개의 TA 레이저를 매우 가깝게 배치, (b) 35cm 거리를 두고 평행하게 배치

그림 4는 두 개 레이저 및 마이크로폰의 배

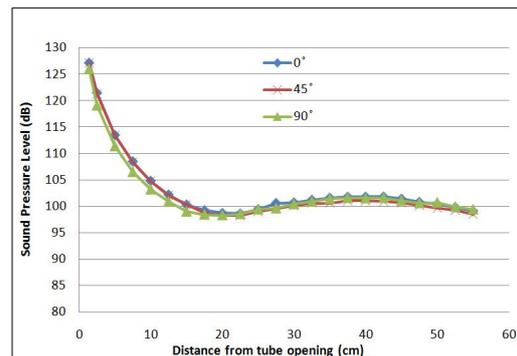
치를 보여주고 있다. 그림 4 (a)는 두 개의 TA 레이저를 포커싱 지점을 기준으로 일정한 각도를 두고 가깝게 배치를 하였다. 그림4(b)는 두 개의 레이저를 평행하게 설치하였으며 그 간격은 35cm이며 MIC1과 MIC2는 각각 레이저의 출구에 설치하고 MIC3은 중심에 설치하였다.

### 3. 결 과

그림 5는 TA 레이저의 출구에서 세 방향(0°, 45°, 90°)에서의 거리에 따른 음압레벨을 보여주고 있다. 그림 5 a)는 인가 전원이 18.9W 이고 그림5 b)는 25.1W이다.



(a)



(b)

그림 5. 세 방향(0°, 45°, 90°) 및 거리에 따른 음압레벨의 변화; (a) 인가 전원 = 18.9W (b) 25.1W

그림 5에서 알 수 있듯이, 음압레벨(SPL)

은 거리가 증가됨에 따라 급격히 감소하였다. 세 방향에서의 압력 변화는 미미하였으며 구형파의 중심에서 0°의 음압레벨이 가장 높았고 45°에서의 음압레벨이 그 뒤를 이었다. 측정지점이 TA레이저 출구에서 멀리 떨어진 지점에서는 방향에 관계없이 거의 동일하게 측정되었다. 그러므로 음향파가 방출되는 지점(TA레이저 출구)을 제외하고는 발생한 음향파는 구형파의 형태로 모든 방향에 걸쳐 퍼져나간다는 것을 확인 할 수 있다.

본 연구에서 측정된 음압레벨은 약한 공급전원과 그 크기가 소형이어서 다른 유사한 형태의 TA레이저에서 발생하는 음향파의 음압레벨보다 다소 낮았다. Arnott et al[1]의 실험에서는 공명기의 길이는 72.7cm이고 직경은 4.32cm이었다. 발생한 음향파의 음압레벨과 주파수는 출구에서 각각 130dB, 116Hz 이었다. Chen 과 Garrett[4]는  $\lambda/4$  길이의 TA레이저를 가동시키기 위해서 직경 100cm의 프레넬렌즈를 사용하였으며 출구로부터 100cm 떨어진 지점에서의 음압레벨은 12dB 이었다.

음압레벨의 측정지점은 출구로부터 2~20cm로 인가전원에 관계없이 20dB까지 감소하였다. 이는 구형파가 확산될 때 그 압력은 거리에 반비례 한다는 Inverse distance law( $p \sim 1/r$ )[12]에 일치한다.

40cm 부근에서 SPL이 약간의 증가 현상을 보이는데 이는 반사된 음향파 또는 기본진동수 외의 조화음들 사이의 위상차 때문에 발생하는 것으로 사료되어진다. Arnott et al.[1]의 실험에서는 TA 레이저에서 발생하는 기본진동수의 음압레벨은 거리에 따라 일관성 있게 감소함을 보였다. 하지만 높은 배음(상위 조화음)인 경우에는 항상 성립되는 것은 아니었다. 조화음이 225Hz인 경우 34.3cm에서의 음압레벨이 17.2cm의 음압레벨보다 15dB 정도 높았다.

표 1은 두 개의 TA레이저를 일정한 각도를 두고 가깝게 배치(그림 4(a))하였을 때의

음압 레벨 측정 결과를 보여 주고 있다. 이 경우 각각의 TA레이저에서 발생한 음향파의 위상차는 시간에 따라 변하지 않았고 음압레벨과 세기도 일정하게 유지 되었다. 그림 6은 시간에 따른 각각의 음향파를 보여주고 있다.  $\theta=36^\circ$  이고, 두 개의 TA레이저를 모두 작동시켰을 경우 포커싱 지점에서의 음압레벨은 한 개의 TA레이저만 작동시켰을 때 보다 약하다는 것을 알 수 있다. 그림 6으로부터 TAL1과 TAL2에서 발생하는 음향파의 위상차가 거의  $180^\circ$  인 것을 알 수 있다.

표 1. 한 쌍의 TA레이저의 포커싱 지점에서의 음압레벨[dB].

실험 방법		A	B	C
r=4cm $\theta=90^\circ$	V <sub>1</sub> =5.17 V <sub>2</sub> =5.82	111.2	107	111.1
	V <sub>1</sub> =5.67 V <sub>2</sub> =6.4	113.3	116	113.3
r=4cm $\theta=36^\circ$	V <sub>1</sub> =5.45 V <sub>2</sub> =5.53	117.5	108	116
	V <sub>1</sub> =6.08 V <sub>2</sub> =6.12	120	109	117.5

r= 공명기 출구에서 부터의 측정 거리;  $\theta$ =TAL1과 TAL2의 중심축 사이 각도; V<sub>1</sub>=TAL1의 니크롬선의 전압차; V<sub>2</sub>=TAL2의 니크롬선의 전압차.

A : TAL1 on, TAL2 off  
B : TAL1 on, TAL2 on  
C : TAL1 off, TAL2 on

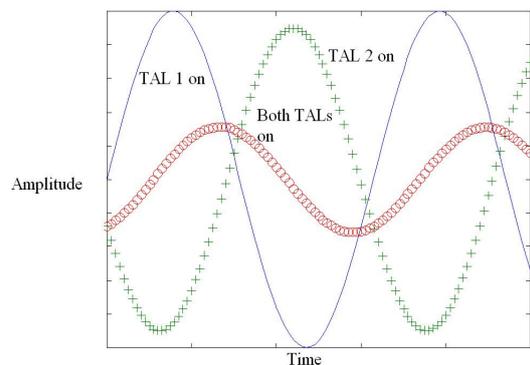
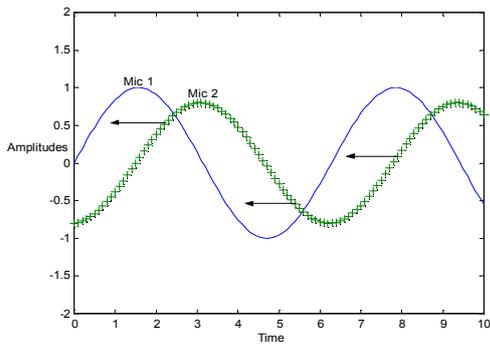
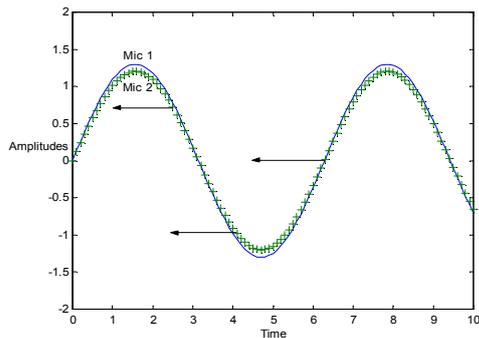


그림 6.  $\theta=36^\circ$  일 때, 포커싱 지점에서의 음향파.

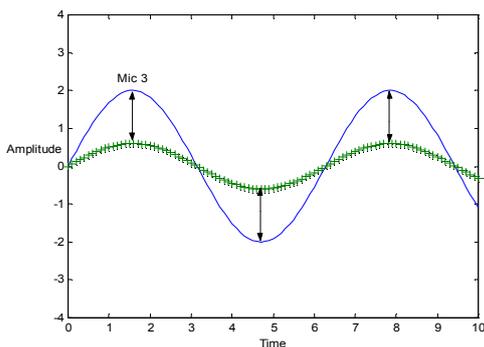
표 1에서 알 수 있듯이, 두 TA레이저 사이의 각도( $\theta$ )가 커지게 되면, 음압레벨은 크게 감소되지 않는다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 두 개의 TA레이저가 평행하여 떨어져 있을 경우 각각의 장치에서 발생된 음향 파형; (a) 위상이 맞지 않는 파형, (b) 위상이 일치 할 때의 파형, (c) 두 개의 TA레이저 중심에서 측정된 파형.

그림 7은 두 개의 TA 레이저가 떨어져 배치된 경우(그림 4(b))의 측정된 음향파형을 보여주고 있다. 그림 7(a)과 (b)에서처럼 MIC 1번과 2번에서 측정된 파형의 위상차는 지속적으로 변했다. MIC1의 신호는 오실로스코프 화면에서 정적인 반면, MIC2의 신호는 그림 7에서와 같이 왼쪽으로 이동하였다. MIC2의 신호가 왼쪽으로 이동하다가 위상이 일치할 경우 두 신호의 진폭이 모두 증가 하였으며 그 크기는 한 개의 TA레이저에서 발생하는 최대값보다 증가 하였다.

그림 7 (c)은 MIC3에서 측정된 신호의 파형을 보여주고 있다. 이 신호는 각각의 TA레이저에서 발생하는 두 개의 음향파의 위상차가  $0^\circ$ 에서  $180^\circ$ 까지 변화함에 따라 최소치와 최대치 사이에서 진동하였다.

두 개의 레이저의 길이 및 직경이 같기 때문에 MIC1~MIC3에서 측정된 주파수는 거의 동일하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 동일한 크기를 갖는 한 쌍의 TA레이저를 제작하고 비슷한 크기의 전원을 인가하였을 때 발생하는 음향파를 관찰 하고 발생된 음향 에너지에 대하여 조사를 하였다.

TA레이저에서 발생하는 음향파는 공명기 출구를 벗어나면서 구형파로 변하고 음압은  $1/r$ , 에너지는  $1/r^2$  에 따라 감소된다. 공명기의 출구는 구형파의 중심이며 이 중심을 기준으로 방향에 따라 음향파의 세기 변화는 미미 하였다.

두 개의 TA레이저가 평행하게 떨어져 배치되었을 경우에는 위상차가 시간에 따라 변화하는 것을 알 수 있었다. 위상차가 일치되는 시점에서는 그 세기가 경미하게 증가하는 것을 관찰 하였다. 두 개의 TA레이저가 가까이 있을 경우에는 위상차가 거의  $180^\circ$ 로 유지 되었다. 이 때, 포커싱 지점에서의 음향에너지

지는 매우 낮게 측정 되었다. 거리에 따라 급격하게 감소되는 음압레벨은 적용성에 문제가 될 수 있다. 따라서 이를 개선하기 위하여 다수의 TA발생 장치를 배열 하여 음압레벨을 증폭 시킬 필요가 있다. 또한, 추후 연구에서는 고밀도 태양에너지를 열원을 사용함으로써 전기에너지를 전혀 사용하지 않는 음향과 발생장치를 구현 할 수 있을 것으로 사료되어진다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 : 2010-0028726).

### 참 고 문 헌

1. Arnott WP, Raspet P, Bass HE. 1991. Thermoacoustic engines. Proceedings of IEEE Ultrasonics Society. Editor : McAvory BR. : 995-1003.
2. Bass HE, Raspet R, Belcher JR, Brewster J. 1995. A study of element interaction in thermoacoustic engines. Annual Report of ONR Grant # N00014-93-1-0077.
3. Chen G, Ke T, Tao J. 2004. Advances in thermoacoustic engine and its application to pulse tube refrigeration. Chinese Science Bulletin 49(13) : 1319-1328
4. Chen RL, Garrett SL. 1998. The solar/heat driven thermoacoustic engine. J. Acoust. Soc. Am. 103(5) : 2841-2842.
5. Donald F, Thermoacoustic Oscillations, Wave Motion & Optics Spring 2006.
6. Gardner DL, Swift GW. 2003. A cascade thermoacoustic engine. J. Acoust. Soc. Am. 114 (4): 1905 - 1919.
7. Nguyen AT. 2004. Creating sound with heat. California State Science Fair 2004 (<http://www.usc.edu/CSSF/History/2004>). Project number S1516
8. Rodriguez IA, Symko OG. 2010. Heat to electricity using thermoacoustics. Abstract # Y29.012. American Physical Society. APS March Meeting 2010.
9. Shen C, He Y, Li Y, Ke H, Zhang D, Liu Y. 2009. Performance of solar powered thermoacoustic engine at different tilted angles. Applied Thermal Engineering 29(13): 2745-2756.
10. Symko OG, Abdel-Rahman E, Kwon YS, Emmi M, Behunin R. 2004. Design and development of high-frequency thermoacoustic engines for thermal management in microelectronics. Microelectronics J. 35: 185-191.
11. Swift GW. 2002. Thermoacoustics - A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators. Publisher : Acoustical Society of America, Melville, NY.
12. Tontechnik-Rechner-sengpielaudio. 2010. Sound pressure p and the inverse distance law 1/r. Retrieved from <http://www.sengpielaudio.com/calculator-distancelaw.htm>. July 2010.