

스택의 채널 수에 따른 열음향파의 특성 비교 연구

A Comparative Study on the Characteristics of Thermoacoustic Waves by the Stack Channel Number

박성식 · 천원기 · 김남진†

Park Sung-Seek*, Han Sang-Pil**, Jeon Yong-Han**, Kim Jong-Yoon***
and Kim Nam-jin*†

(Submit date : 2013. 3. 29., Judgment date : 2013. 4. 13., Publication decide date : 2013. 7. 16.)

Abstract : The conversion of solar energy into acoustic waves is experimentally studied. Measurements were made on the Sound Pressure Level (SPL), onset time and the temperature gradient across the stack, with the Cell Per Square Inch (CPSI) of stack changed. 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. As a result, when the supply electric power was 25 W, maximum SPLs of 104.1 dB, 109.4 dB and 112.8 dB were detected for the stacks of 200, 300 and 400 CPSI and their respective stack positions of 70mm, 60mm and 50mm from the closed end.

Key Words : 열음향파(Thermoacoustic waves), 공명튜브(Resonance tube), 스택(Stack), 채널 수(Channel number), 음압레벨(Sound pressure level)

1. 서 론

태양열 및 폐열과 같은 에너지를 열원으로 사용할 수 있는 열음향(Thermoacoustic) 시

스템은 열에너지를 소리에너지로 변환시켜 발생하는 열음향파를 이용한 시스템이다. 고온부에서 저온부로 열이 전달되면서 열에너지를 소리에너지로 변환시키며, 펌프 또는 압축기

† 김남진(교신저자) : 제주대학교 에너지공학과
E-mail : jnkime@jejunu.ac.kr Tel : 064-754-3643
박성식 : 제주대학교 에너지공학과
천원기 : 제주대학교 에너지공학과

† Kim Nam-Jin(corresponding author) : Department of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University.
E-mail : jnkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3643
Park Sung-Seek : Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University
Chun Won Gee : Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University

와 같은 기계장치를 필요로 하지 않는다. 따라서 비교적 구조가 간단하고, 시스템의 단순화와 소형화가 가능하기 때문에 차세대 열변환 시스템으로 기대되고 있다.¹⁾ 또한 열음향 시스템은 발생하는 주파수의 세기를 조절하여 특정 주파수를 갖는 열음향파를 발생시킬 수 있기 때문에 저주파 및 고주파를 발생시켜 의료, 계측 및 탐지, 정보통신, 설비진단, 엔진, 펌프, 냉장 및 냉동기, 레이저 등 다양한 산업분야에 이용이 가능하다.¹⁾²⁾ 또한 발생하는 열음향파는 압축파와 같은 충격파와 진동을 발생시키기 때문에 압전기(Piezoelectric)와 같은 음향전원변환기에 적용할 경우 전기를 생산할 수 있다.³⁾

스택을 사용하였을 때, 열음향 시스템의 성능이 우수하다고 보고되었다.⁷⁾ 하지만 아직까지 공명튜브 내부에 사용되는 스택의 채널 수(Cells per square inch, CPSI)에 따른 열음향과의 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 태양열 및 폐열을 열원으로 사용하는 열음향 시스템의 개발을 위하여 공명튜브내의 온도구배를 증가시켜 음향 임피던스 역할을 수행하는 스택의 채널 수와 공급전력에 따른 열음향과의 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL), 최초발생시간 및 온도구배 측정실험을 수행하였으며, 발생하는 열음향과의 특성을 비교분석 하였다.

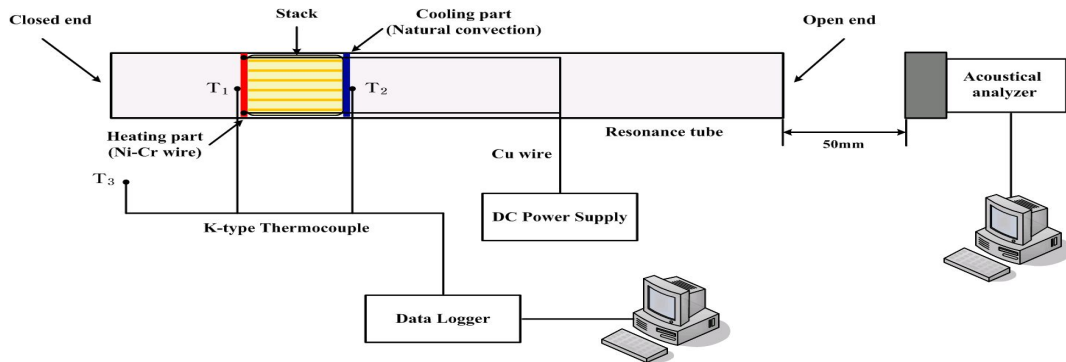


Fig. 1. Schematic diagram of the thermoacoustic experimental apparatus.

특히, Kohei Hotta et al.은 스테인리스관을 이용한 소형 열음향 시스템을 제작하여 660Hz의 주파수를 발생시켰다.⁴⁾ 또한 O. G. Symko et. al.은 열음향 엔진을 이용하여 4.5 kHz의 주파수를 갖는 열음향파를 성공적으로 발생시켰고, 열음향 시스템에 소형 압전소자를 설치하여 7.4V의 전기를 성공적으로 생산하였다.^{5,6)}

또한 최근에는 열음향 시스템에서 단열 및 음향 임피던스 역할을 수행하는 스택의 형상을 핀, 평행, 나선보다 사각형 모양의 채널을 가지고 있는 벌집형상(Honey-comb type)의

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 열음향 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 $v/4L$ (v :음파속도, L :길이)의 음향파를 발생시키는 공명튜브와 고온부와 저온부의 열교환 역할을 수행하는 스택, 발생하는 열음향파의 음압레벨과 주파수를 측정할 수 있는 음향파 분석기(AL1 Acoustilyzer), 가열면에 전력을 공급하기 위한 직류 전원 공급기(DAP-125), 데이터의 수집과 저장을 위한 데이터로거(Agilent

34970A)와 컴퓨터로 구성되어 있다. 벌집형태의 스택은 Fig. 2와 같이 1개의 K-type 온도센서, 니크롬선과 구리선으로 구성되어 있으며, Fig. 3에 본 연구에서 사용된 200, 300, 400 CPSI의 스택을 나타내었다. 본 연구에서는 스택의 채널 수에 따른 열음향파의 특성을 분석하기 위하여 기존의 연구결과를 바탕으로 스택의 길이는 25mm로 고정하였고, 발생하는 주파수의 성질을 결정짓는 공명튜브의 형상은 길이와 직경을 각각 200mm, 20mm로 고정하였다.⁸⁾

특히, 실험시작 후 실험장치의 고온부 온도가 급격히 증가하기 때문에 공명튜브는 고온에 강한 Pyrex 재질을 사용하였고, 스택은 세라믹 재질을 사용하였다. 또한 실험장치의 외부, 고온부, 저온부의 온도측정을 위해 총 3개의 K-type 온도센서를 사용하였다. 그리고 음압레벨 측정 범위가 30 - 130 dB이며, 주파수의 측정 범위가 10 Hz - 20 kHz인 음향파 분석기를 공명튜브의 열린 부분에서 50mm 떨어진 위치에 설치하여 실험장치에서 발생하는 열음향파를 측정하였다.

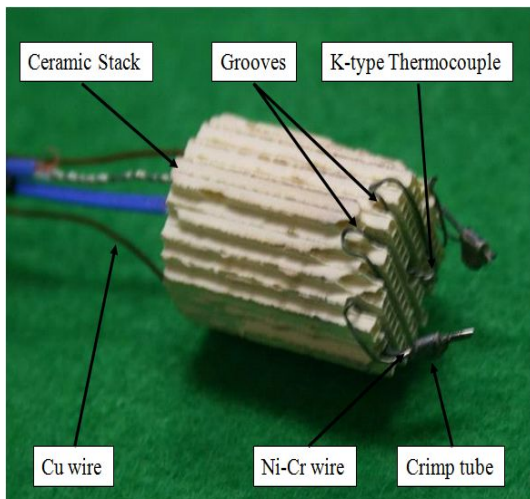
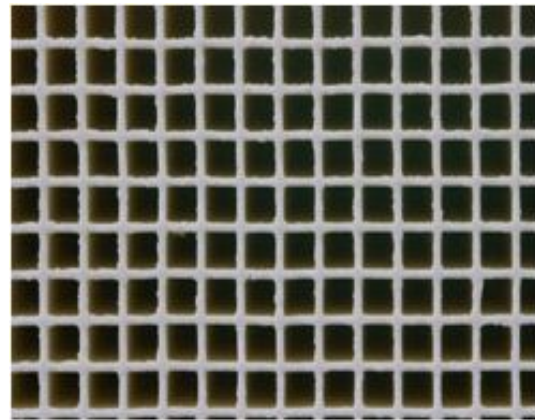


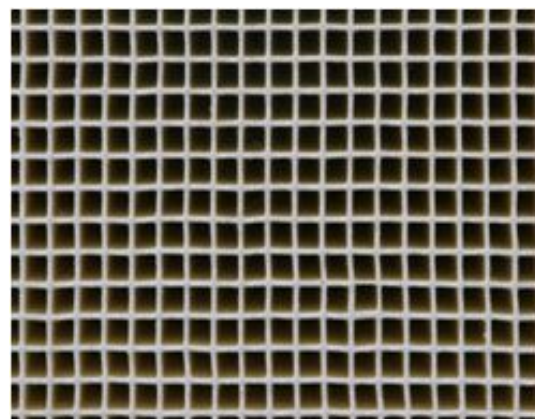
Fig. 2. Photograph of the ceramic stack.



(a) 200 CPSI



(b) 300 CPSI



(c) 400 CPSI

Fig. 3. Ceramic stack of Honey-comb type.

3. 실험방법 및 결과

3.1 스택의 채널 수와 위치에 따른 열음향파 측정

본 실험에서는 스택의 채널 수와 스택의 위치에 따른 열음향파의 특성을 비교분석하기 위하여 열음향 발생실험을 수행하였다. 각 스택의 길이와 공급전력은 25mm, 25 W로 고정하였다. 스택의 채널 수는 200, 300, 400 CPSI로 변화시켰으며, 스택의 위치는 튜브의 단면에서 1 ~ 15 cm로 변화시켰다. 음압레벨은 음향과 분석기를 이용하여 1초마다 측정하였고, 공명튜브내의 가열부와 냉각부 온도 역시 데이터 로거를 이용하여 1초마다 측정하고, 열음향파가 발생했을 때의 온도구배를 계산하였다. 열음향 시스템에서 발생하는 열음향파는 대부분 1분 이내에 발생하기 때문에 모든 실험은 3분 동안 진행하였으며, 3분이 지나도 음향파가 발생하지 않을 경우에는 음향파가 발생되지 않은 것으로 판단하고 실험을 종료하였다.

Fig. 4는 스택의 채널 수와 스택의 위치에 따른 음압레벨을 나타낸 그래프이다. 스택의 채널 수가 200 CPSI일 경우 스택의 위치가 튜브의 단면에서 7, 8 cm 지점에서만 열음향파가 발생하였으며, 300 CPSI에서는 4-12 cm, 400 CPSI에서는 3-13 cm 사이의 지점에서 열음향파가 발생됨을 확인하였다. 200 CPSI 스택인 경우 각 채널의 크기가 너무 크기 때문에 가열면과 냉각면의 열교환기 역할과 단열 역할을 담당하는 스택이 제대로 그 기능을 수행하지 못한 것으로 판단된다.

또한 200, 300, 400 CPSI의 스택에서 평균음압레벨이 가장 높은 스택의 위치는 튜브의 단면에서 각각 7 cm, 6 cm, 5 cm임을 확인하

였고, 이 때의 평균음압레벨은 각각 103 dB, 108 dB, 111.8 dB이며, 최고음압레벨은 104.1 dB, 109.4 dB, 112.8 dB임을 알 수 있었다. 따라서 스택의 채널 수가 200, 300, 400 CPSI로 증가할수록 최고음압레벨을 발생시키는 스택의 위치가 1 cm씩 감소한다는 사실을 알 수 있었다. 이와 같은 실험결과로 열음향파의 발생구간과 평균음압레벨은 스택의 채널 수와 스택의 위치에 따라 달라진다는 것을 알 수 있었으며, 스택의 채널 수가 증가할수록 평균음압레벨과 열음향파가 발생하는 구간이 넓어짐을 알 수 있었다.

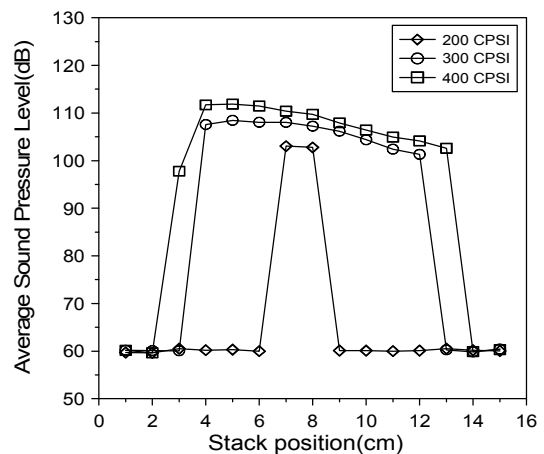


Fig. 4. SPL as function of the stack CPSI and position.

Fig. 5는 열음향파가 발생된 구간에서 스택의 채널 수와 스택의 위치에 따른 열음향파 발생시간을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 열음향파 발생시간이 가장 짧은 스택의 위치는 200, 300, 400 CPSI에서 각각 8 cm, 8cm, 7 cm이고, 이 때 열음향파 발생시간은 각각 44초, 15초, 11초임을 확인하였다. 따라서 스택의 채널 수가 증가함에 따라 열음향파 발생시간이 감소한다는 것을 알 수 있었다. 최대음압을 발생시키는 스택의

위치는 7 cm, 6 cm, 5 cm 지점이지만 최초 발생시간은 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 때문이라고 보고한 G. W. Swift⁹⁾의 연구결과와 일치하며, 이와 같은 실험결과로 스택의 위치뿐만 아니라 스택의 채널 수도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 음압의 세기뿐만 아니라 열음향파의 발생에도 스택의 채널 수가 중요하게 작용한다는 사실을 알 수 있었다.

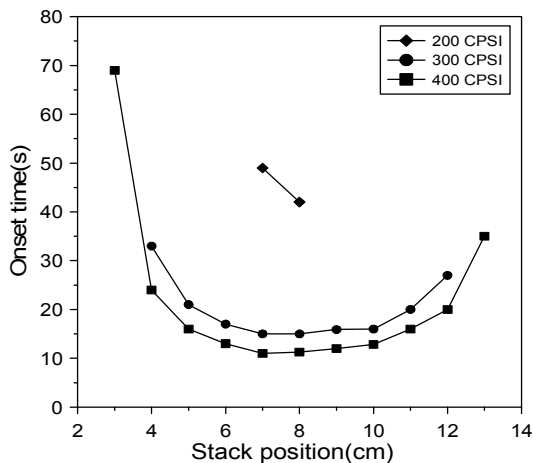


Fig. 5. Thermoacoustic waves onset time.

Fig. 6은 열음향파가 발생했을 때 스택의 고온부와 저온부의 온도구배를 스택의 채널 수에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 스택의 채널 수와 스택의 위치에 따른 열음향파 발생온도구배의 경향은 Fig. 5의 열음향파 발생시간 그래프와 유사한 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 스택의 채널 수가 증가함에 따라 열음향파 발생 온도구배는 감소함을 알 수 있었다. 또한 스택

의 위치가 튜브의 닫힌 면과 열린 면에 가까워 질수록 발생온도구배가 증가한다는 사실을 알 수 있다. 발생온도구배가 가장 낮은 스택의 위치는 200, 300, 400 CPSI에서 각각 8 cm, 8 cm, 7 cm이며, 이는 열음향파 발생시간이 가장 짧은 스택의 위치와 동일하다는 것을 확인하였다. 이와 같은 실험결과는 태양열 및 폐열을 열원으로 사용하는 열음향 시스템의 개발에 있어서 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

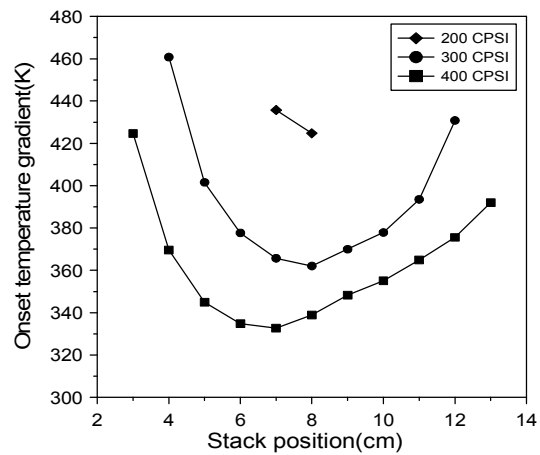


Fig. 6. Thermoacoustic waves onset temperature gradient.

3.2 스택의 채널 수와 공급전력에 따른 열음향파 측정

본 실험에서는 스택의 채널 수와 공급전력에 따른 열음향파 발생실험을 수행하였다. 먼저 열음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력을 알아보기 위하여 공급전력을 0 W에서부터 1W 씩 증가시키면서 스택의 채널 수에 따른 최소공급전력을 측정하였으며, 최소공급전력을 측정한 후에는 공급전력을 20, 25, 30, 35 W로 변화시키면서 열음향파의 특성을 비교 분석하였다. 스택의 위치는 200, 300, 400 CPSI 스택에서 가장 높은 음압을 나타낸 지점인 7 cm, 6 cm, 5 cm으로 고정하였다.

Fig. 7은 열음향파를 발생시킬 수 있는 최소 공급전력을 스택의 채널 수에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 스택의 채널 수가 증가할수록 열음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 감소하며, 발생하는 열음향파의 평균음압레벨은 증가한다는 것을 알 수 있다. 음향파를 발생시CPSI에서 각각 20 W, 16 W, 14 W이고, 이 때의 평균음압레벨은 92.11 dB, 97.04 dB, 99.20 dB로 측정되었다. 이는 스택의 채널 수가 증가할수록 열음향파를 발생하는데 필요한 열에너지가 감소하며, 음향파의 음압레벨은 증가한다는 것을 의미한다.

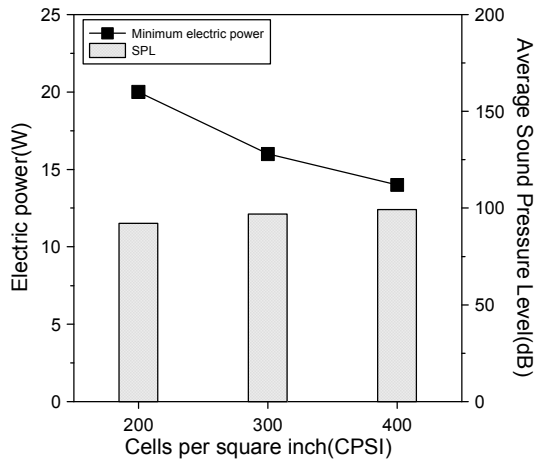


Fig. 7. Minimum electric power and SPL.

Fig. 8은 공급전력을 20 ~ 35 W로 증가시키면서 측정한 열음향파의 평균음압레벨을 스택의 채널 수에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 스택의 가열부에 공급되는 전력이 증가할수록 평균음압레벨도 증가한다는 것을 알 수 있다. 공급전력이 35 W일 때 평균음압레벨은 200, 300, 400 CPSI에서 각각 109.44 dB, 111.72 dB, 114.71 dB임을 확인하였으며, 20 W 대비 음압증가율은 각각

18.8%, 6.2%, 4.5%로 스택의 채널 수가 증가할수록 공급전력에 따른 음압증가율은 감소한다는 것을 알 수 있었다.

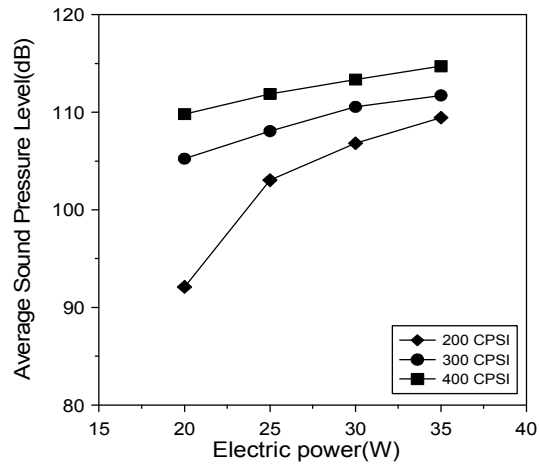


Fig. 8. SPL as function of the stack CPSI and supply power.

4. 결 론

본 연구에서 스택의 채널 수와 위치 그리고 공급전력에 따른 열음향 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열음향파가 발생하는 구간은 200, 300, 400 CPSI의 채널 수를 갖는 스택에서 각각 7, 8 cm, 4-12 cm, 3-13 cm임을 확인하였고, 스택의 채널 수가 증가할수록 열음향파가 발생하는 구간은 확장된다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 200, 300, 400 CPSI의 채널 수를 갖는 스택에서 평균음압레벨이 가장 높은 스택의 위치는 튜브의 닫힌 면에서 각각 7 cm, 6 cm, 5 cm이며, 이 때의 평균음압레벨은 각각 103 dB, 108 dB, 111.8 dB임을 알 수 있었다.
- (3) 열음향파 발생시간이 가장 짧은 스택의 위치는 200, 300, 400 CPSI에서 각각 8 cm, 8cm, 7 cm이고, 이 때 열음향파 발생시간

은 각각 44초, 15초, 11초임을 확인하였다. 또한 열음향과 발생온도구배가 가장 낮은 스택의 위치는 열음향과 발생시간이 가장 짧은 스택의 위치와 동일함을 알 수 있었으며, 스택의 채널 수가 증가함에 따라 열음향과 발생시간과 음향과 발생온도구배는 감소함을 알 수 있었다.

(4) 열음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 200, 300, 400 CPSI에서 각각 20 W, 16 W, 14 W이고, 스택의 채널 수가 증가할수록 열음향파를 발생시키는 필요한 전력이 감소한다는 것을 알 수 있었다. 또한 35 W일 때 20 W 대비 음압증가율은 각각 18.8%, 6.2%, 4.5%로 스택의 채널 수가 증가할수록 공급전력에 따른 음압증가율은 감소한다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Swift. G.W., Thermoacoustic Engines and Refrigerators, Physics Today, No. 7, Vol. 48, pp. 22-28, 1995.
2. Backhaus. S. and Swift. G.W., A thermo-acoustic Stirling heat engine, Nature, vol. 399, pp.335-338, 1999.
3. Symko. O.G., Using sound to turn heat into electricity, News Center, University of Utah, 2007.
4. Kohei Hotta et al., A prototype of small-size and self-oscillate thermo acoustic system, IEEE International Ultrasonics Symposium Proceeding, ULTSYM, 2009.
5. Symko. O.G. et. al., Acoustic approach to thermal management, Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 12th IEEE Intersociety Conference, 2010.
6. Symko. O.G. et. al., Design and development of high-frequency thermoacoustic engines for thermal management in microelectronics, Microelectronics Journal, Vol. 35, pp. 185-191, 2004.
7. 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.
8. Park. S.S, An. E.J, Oh. S.J, Chun. W.G, Kim. N.J, A Comparative Study on the Characteristics of Thermoacoustic Laser for Applying Solar Energy, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol.32, No.2, pp. 105-112, 2012.
9. Swift. G.W., Thermoacoustics-A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators, Acoustical Society of America, pp. 1-300, 2002.