



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

碩士學位論文

탄소나노튜브 적용 나노유체 및 스택의
형상에 따른 열음향레이저의 특성 연구

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

安 應 鎭

2013年 2月

탄소나노튜브 적용 나노유체 및 스택의 형상에 따른 열음향레이저의 특성 연구

指導教授 金南鎭

安應鎭

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2013年 2月

吳元鍾의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金南鎭 (印)

委 員 李潤俊 (印)

委 員 千院基 (印)

濟州大學校 大學院

2013年 2月

A Study on the Characteristic of Nanofluids Using
Carbon Nanotubes and Thermal acoustic Laser

Eoung Jin An
(Supervised by Professor Namjin Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2013. 2.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis Director, Namjin Kim, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....
.....
.....

.....

Date

Department of Nuclear & Energy Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
I. 서 론	1
1. 탄소나노튜브를 적용한 나노유체	1
2. 열음향 레이저(Thermal Acoustic Laser)	3
II. 이론적 배경	5
1. 탄소나노튜브를 적용한 나노유체	5
1.1 탄소나노튜브의 개요	5
1.2 탄소나노튜브의 종류 및 구조	5
1.3 탄소나노튜브의 성질	6
1.4 탄소나노튜브의 분산 방법	8
2. 열음향 레이저(Thermal Acoustic Laser)	11
2.1 음파의 주기적 파동	11
2.2 음향파의 발생	13
2.3 파동방정식	14
III. 나노유체의 특성	17
1. 탄소나노튜브 및 기본유체	17
2. 나노유체의 제조	18
2.1 화학적 개질에 의한 분산(강산)	18
2.2 기계적 분산(초음파)	20

LIST OF FIGURES

Figure 1. Structures of Carbone Nanotubes.	5
Figure 2. Periodic waves	
(a) Transverse wave	
(b) Longitudinal wave	5
Figure 3. SEM Photos of Carbon nanotubes	5
Figure 4. The oxidation process of Carbon nanotubes	5
Figure 5. The experimental apparatus of produce oxidation MWCNTs.	5
Figure 6. The ultrasonic dispersing(VC-505).	5
Figure 7. Diagram of Wheatstone Bridge.	5
Figure 8. Diagram of wheatstone bridge experimental apparatus.	5
Figure 9. Photograph of wheatstone bridge experimental apparatus.	5
Figure 10. Photograph of Platinum wire	5
Figure 11. Photograph of Data logger(34970A).	5
Figure 12. SPhotograph of DC Power supply(E3648A).	5
Figure 13. Photograph of bath circulator.	5
Figure 14. The measurement experimental apparatus of viscosity.	5
Figure 15. Validation of water and Ethanol to measure the therma conductivities of the base fluid.s	5
Figure 16. Thermal Conductivity of Nanofluids based on Distilled Water ...	5
Figure 17. Thermal Conductivity of Nanofluids based on Ethanol	5
Figure 18. Thermal Conductivity of Nanofluids based on Mixed Water-Ethanol	5
Figure 19. Viscosity of Nanofluids based on Distilled Water	5
Figure 20. Viscosity of Nanofluids based on Ethanol	5
Figure 21. Viscosity of Nanofluids based on Mixed Water-Ethanol	5
Figure 22. Thermoacoustic laser system	5

Figure 23. Photograph of a stack	5
Figure 24. Photograph of a resonance tubes	5
Figure 25. Acoustic analyzer for measuring characteristics of acoustic waves	5
Figure 26. Photograph of data logger(34970A)	5
Figure 27. Photograph of power supply	5
Figure 28. Schematic of thermoacoustic laser system	5
Figure 29. SPL with stack position (tube length : 100mm)	5
Figure 30. SPL with stack position (tube length : 150mm)	5
Figure 31. SPL with stack position (tube length : 200mm)	5
Figure 32. Onset time of acoustic waves with stack position (tube length : 200mm)	5
Figure 33. Gradient of generated acoustic waves with stack position (tube length : 200mm)	5
Figure 34. SPL with stack length (tube length : 200mm)	5
Figure 35. Figure 35. Min. power generating acoustic wave	5
Figure 36.SPL with input power	5

LIST OF TABLES

Table 1. General Property of Carbon Nanotube	6
Table 2. Properties of OMWCNTs (Oxidized CM-100).	6
Table 3. Experimental conditions	6

SUMMARY

1 . Characteristics of Carbon Nanofluids

Nano-technology has become recognized as one of the essential technologies in the 21st century. The nanofluids terminology, which describes fluid combined nanoparticles, was introduced by Choi of the Argonne National Laboratory in the U.S. Department of Energy. The carbon particles with metal lattice or graphite structures generally exhibit thermal conductivities those are hundreds of times greater than pure fluids. Especially due to their outstanding electric and thermal conductivities, carbon nanotubes have become an important entity in the scientific field.

Therefore, in this study, for increasing the efficiency of solar collector and heat exchanger, the thermal conductivity and viscosity of nanofluids were measured. Nanofluids were manufactured by ultra-sonic dispersing Oxidized Multi-walled Carbon Nanotubes in base fluids at the rates of 0.0005 ~ 0.1 vol%. We used distilled water, ethanol and mixed water-ethanol as base fluids. The thermal conductivity and viscosity of nanofluids were measured at the low temperature(10°C), the room temperature(25°C) and the high temperature(70°C).

2. Characteristics of Thermoacoustic Laser

Thermoacoustics is a field that involves the study of both acoustics and thermodynamics. In other words it is known as the study that involves sound waves and the conversion of one form of energy into another. When a sound wave travels through a gas, it creates pressure and velocity oscillations within the gas it travels. These oscillations will produce a

"thermoacoustic" effect. The engines which produce a "Thermoacoustic" effects are known as thermoacoustic engine. Thermoacoustic engines find their use in various fields like medicine, thermodynamics, fluid mechanics and material sciences and so on. For example, ultrasound is used to shatter kidney stone. Shock waves are used in mining and material processing. They are also used in cleaning and sterilizing surfaces and medical instruments by sanitizing liquids. Recent developments in thermoacoustic engines like using solar energy or waste heat to run them makes it promising and economically sound for generating large quantities of acoustic energy. These engines have been looked at with increased interest in recent years due to useful applications like converting thermal energy into acoustic energy thermoacoustic energy and acoustic energy on to refrigeration.

In this study, to find out the characteristics of thermoacoustic laser, we experimented thermoacoustic laser oscillated at various shapes of resonance tube, stack, power.

I. 서론

최근 현대 사회는 급격한 산업의 발달로 인하여 에너지의 수요가 매년 증가 추세에 있다. 이에 따라 점점 증가하는 에너지의 수요를 충족시키기 위하여 석유, 석탄, 가스 등 화석 에너지의 소비 증가하고 있으며, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 수소불화탄소(HFC), 아산화질소(N₂O) 등 온실가스의 발생량 또한 함께 증가하고 있다.[IEA, 2010] 이에 사람들은 에너지 수요 충족 및 온실가스 감축을 목적으로 시스템의 효율 증가와 새로운 에너지 자원의 발견을 위해 많은 연구를 하고 있다. 그 중에서도, 태양열 에너지는 온실가스를 발생시키지 않으며, 자원의 공급이 무한한 에너지 자원 중 하나로써 이를 활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 많은 청정에너지 자원들 중에서 안정성과 신뢰성이 높은 태양열 에너지 이용을 극대화하기 위한 연구를 수행하였으며, 본 연구를 통하여 개발된 기술을 효율적으로 이용할 경우 온실가스의 저감은 물론 에너지원으로써 태양열의 이용을 극대화시켜 상당한 경제적 파급효과를 가져올 것으로 기대된다.

본 연구는 태양열 집열기, 히트파이프의 작동유체로 적용하기 위한 나노유체의 특성과 열음향레이저 시스템의 공명튜브와 스택의 형상에 따른 열음향레이저의 특성 변화를 중점적으로 다루고 있다.

1. 탄소나노튜브를 적용한 나노유체

지구는 연간 1.304×10^{21} kcal의 에너지를 태양으로 받고 있으며, 이는 매년 세계에서 소비되는 에너지의 20,000배에 달하는 엄청난 양의 에너지이다.[BP, Statistical of World Energy, 1986] 이처럼 태양열 에너지는 지구상에서 가장 풍부한 에너지 자원이며, 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄) 등 온실가스를 발생시키지 않는 에너지원이다. 하지만 태양열에너지는 단위 면적당 공급받을 수 있는 에너지의 양이 적다는 단점이 있어 이를 효과적으로 이용하기 위해서는 태양열 집열 시스템의 효율을 향상시켜야만 한다.

또한 냉·난방, 온수 공급과 발전, 수송, 생산 등 가정과 산업 전반에 걸쳐 열교환기가 이용되고 있다. 이를 통하여 막대한 양의 에너지가 소비되고 있지만, 열교환기 효율의 한계로 인해 버려지는 에너지 또한 상당하다. 따라서 열교환기의 효율을 향상시켜서 버려지는 폐열을 회수할 수 있다면, 에너지원의 소비를 획기적으로 줄일 수 있으며, 발생하는 온실가스를 원천적으로 감소시킬 수 있다.[Afgam, N. 1996]

이와 같이 집열 시스템의 효율을 향상시키기 위하여, 히트파이프 및 열교환기의 기하학적 형상을 변화시키는 연구가 진행되어 왔다. 하지만 단순히 형상이나 재질의 변경만으로는 효율향상에 한계가 있는 것으로 판단되며, 이를 극복하기 위하여 물, 에탄올, 에틸렌글리콜 등 기본유체로 사용하던 작동유체를 열적특성이 우수한 나노유체로 바꾸어 시스템 전체 효율을 적용시키려는 연구가 진행 중이다.[Jung, E. G. et al., 2006],[Ha H. J. et al., 2011]

나노유체란 나노미터(nm)크기의 고체 입자들이 순수 유체 내에 안정적으로 분산되어 있는 신개념의 유체를 말하며, 산화알루미늄(Al_2O_3), 이산화티타늄(TiO_2), 탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNTs) 등과 같이 높은 열전도도를 갖는 나노입자로 나노유체를 제조할 경우, 기본 유체보다 열전도도가 증가하는 특성이 있다.

Do K. H.는 나노유체를 그루브 워 히트파이프 열성능에 대하여 연구하였으며, 나노유체에 첨가되는 나노입자의 체적비율과 입자의 크기가 증가함에 따라 히트파이프 열저항은 감소하고 열성능은 향상된다고 보고하였다.[Do et al. 2010] Lifei Chen은 실리콘 오일과 1 vol%의 탄소나노튜브를 혼합하여 제조한 나노유체의 열전도도를 측정하여 기본유체인 실리콘 오일 대비 9.5%의 열전도도 향상을 확인하였으며,[Lifei Chen et al, 2009] Liu는 2 vol%의 에틸렌 글리콜 유체의 열전도도를 측정하여 최고 30% 향상 효과를 확인하였다.[Min Sheung Liu et al, 2005] M. Rafati는 물과 에틸렌 글리콜을 기반으로 나노유체를 제조하여 컴퓨터의 냉각 장치의 적용에 대해서 연구하여, 냉각장치에 나노유체를 1.0L/min의 유량으로 흘려주었을 때 Alumina 나노유체가 6°C의 냉각효과가 있음을 확인하였다.[M. Fafati et al. 2012]

따라서 본 연구에서는 열교환기 및 각종 집열 시스템의 효율향상을 위하여

물, 에탄올, 물-에탄올 혼합유체를 기본으로 하는 나노유체를 제조하고 열적특성 및 점도 특성을 분석하였다.

2. 열음향 레이저(Thermoacoustic Laser)

열음향(Thermoacoustic)은 열전달의 메커니즘에 의해 음향파가 발생하는 것을 의미하며, 열이 소리로 변환하는 획기적인 에너지 변환 방법이다. 열음향 시스템은 펌프, 밸브, 컴프레셔와 같은 기계장치를 필요로 하지 않기 때문에 기존의 에너지 변환 방법보다 장비의 구성이 비교적 간단하며, 장비의 제작비용과 유지비용이 적게 든다.

특히 열음향 레이저는 음향파를 발생시키는 공명튜브의 형상에 따라 특정 주파수를 발생시키는 음향파를 발생시킬 수 있으며, 발생된 음향파는 진폭이 파동의 중첩(Constructive interference)으로 매우 높아져 압축파와 같은 충격을 발생시킨다. 전기적인 생성에 의한 스파크를 동반하는 충격파는 중앙, 신장 결석을 제거하는 등 의학에 적용할 수 있으며, 음향파로는 주파수를 초음파 범위까지 증가시켜 초음파 적용 분야까지 대체할 수 있다. 또한 압전소자와 같은 음향 전원 변환기를 적용시키면 전기를 생산할 수도 있다.[O. G Simko et al. 2007] 열음향파 발생 시스템은 공기나 비활성 기체를 작동 유체로 사용하고, 태양 에너지와 같은 청정에너지를 사용하기 때문에, 태양 에너지 분야의 차세대 신기술로써 기대되고 있다.

Sondhauss에 의해 유리관 내의 열음향 현상은 유리관의 열린 면의 내경 용량 등 유리관의 치수에 따른다고 밝혀졌다.[Swift et al. 1988] 1898년 Rayleigh는 Sondhauss의 결과를 튜브 내의 공기가 최고로 압축되었을 때 열을 가하거나, 공기가 팽창되었을 때 열을 제거하면 특정한 진동이 생긴다고 설명하였으며,[Rayleigh L., 1945] 이 후 Feldman은 공명 튜브 내 스택을 위치시켜 가스 스택 간의 열 상호작용에 관한 연구를 하였으며, 스택이 열작용 면적을 넓혀주어 레이저의 성능을 향상시킬 수 있다고 발표하였다.[Feldman L. T. et al. 1970] Bass HE, G. W. Swift와 Donald Fahey는 열음향 레이저의 성능이 최고가 되는 스택의 위치를 튜브의 닫힌 면으로부터 각각 $1/2 \sim 1/4$, $\lambda/20$, $1/3$ 지점이라고 보고하

였다.[Bass et al. 1995], [Swift et al. 2002], [Fahey et al. 2006] Ryan Lampe는 스택의 형상을 변화시켜 레이저 성능을 관찰한 결과, 사각 형상의 스택을 사용하였을 때, 평행, 나선, 핀 형상의 스택을 사용하였을 경우보다 레이저 성능이 우수하다고 보고하였다.[Ryne Lampe et al, 2008]

하지만, 기존의 연구 내용을 보면, 열음향 레이저 시스템에서 발생된 음향파의 현상 분석 위주의 실험이 주를 이루고 있으며, 공명튜브 및 스택의 형상에 따른 음향파의 발생시간, 주파수, 음압레벨에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 태양열을 이용한 고효율 열음향 레이저 개발을 위하여, 공명튜브 및 스택의 형상과 공급전력의 변화에 따른 열음향파의 발생시간, 온도구배, 음압, 주파수 측정을 위주로 실험을 수행하였고, 이 때 발생하는 정상파(Standing wave)의 발생현상과 특성을 분석하였다.

II. 이론적 배경

1. 탄소나노튜브를 적용한 나노유체

1.1 탄소나노튜브의 개요

탄소나노튜브는 1991년 일본의 NEC 사의 기업부설연구소 Iijima 박사가 전기방전법을 사용하여 흑연 음극상에 형성 시킨 탄소덩어리를 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)으로 분석 하는 과정에서 가늘고 긴 대롱 모양의 입자를 발견하여 Nature지에 발표하면서 처음으로 알려지게 되었다.[S. Iijima, 1991.] 이때 형성된 탄소나노튜브의 길이는 수십 nm ~ 수 μm 이었고, 외경은 2.5 ~ 30 nm이었다. 탄소나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 SP^2 결합의 육각형 벌집형태를 이루며, 이 튜브의 직경이 대략 수nm 정도로 극히 작기 때문에 나노튜브라고 부르게 되었다.

탄소나노튜브는 전기전도성, 열전도성 및 강도가 우수하여 반도체, 평판 디스플레이, 배터리, 생체 센서 등 수 많은 응용상품이 개발되고 있다. 또한 탄소나노튜브를 기본 유체 및 제한적인 특성을 지니는 유체에 분산시켜 새로운 특성을 가지는 유체를 개발하려는 연구가 활발하게 진행 중이다.[Y.H. Lee, 2003.]

1.2 탄소나노튜브의 종류 및 구조

탄소나노튜브는 탄소 원자로 구성된 육각형 구조(SP^2)의 벽에 오각형의 결합에 의해서 닫힌 구조를 가지는 튜브 모양의 탄소 동소체로서 직경은 나노미터(nm) 단위이며 길이는 마이크로미터(μm) 단위로 매우 큰 면 비율을 갖는다. 이러한 탄소나노튜브는 길이 방향을 축으로 감싸고 있는 벽의 수에 따라서 단일벽 탄소나노튜브(Single Wall Carbon NanoTubes, SWCNTs), 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon NanoTubes, MWCNTs), 다발형 탄소나노튜브(Rope Carbon NanoTubes)로 분류될 수 있다.

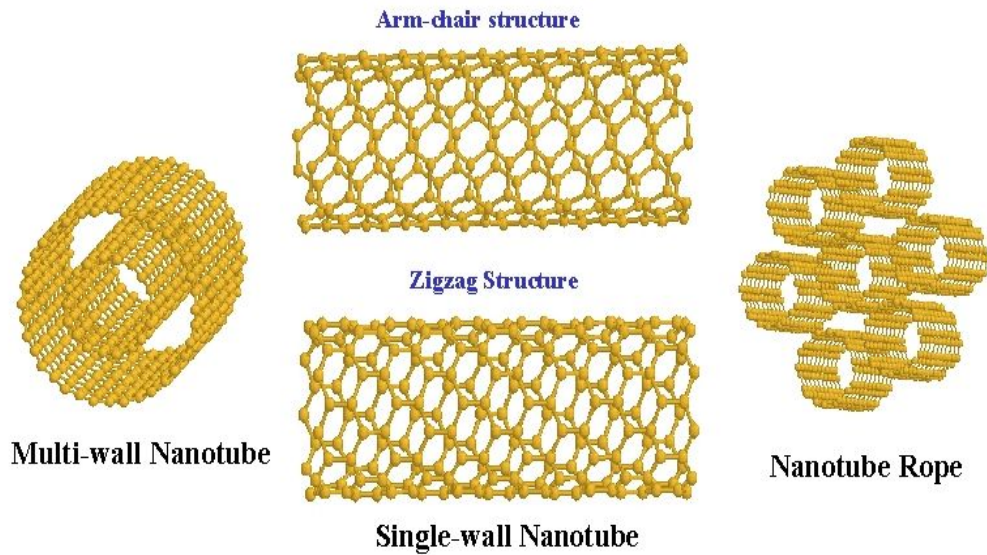


Figure. 1. Structures of Carbon Nanotubes.

탄소나노튜브의 종류 및 구조를 다음 Figure. 1에 나타내었다. 특히 단일벽 탄소나노튜브의 경우에는 그림에서 보면 알 수 있듯이, 말려진 벡터에 따라서 높은 대칭성을 갖는 두 가지 구조인 암체어(Arm-chair), 지그재그(Zig-zag)구조로 크게 나눌 수 있다.[R. Krupke et al. 2003.]

1.3 탄소나노튜브 성질

탄소나노튜브는 나노크기의 흑연면이 원통형 구조로 둥글게 말린 형태를 가지고 있으며, 크기나 형태에 따라 독특한 물리적 성질을 가지는 거대분자(Macromolecule)이다.

탄소나노튜브의 독특한 전기적 특성은 1차원적인 구조와 흑연 고유의 전기적 구조에 기인하며 매우 낮은 전기적 저항 값을 나타낸다. 단일벽 탄소나노튜브의 경우 저항 값은 1/100에 불과하며 전류수송능력은 구리의 1,000배에 이른다. 기계적 물성 측면에서 탄소나노튜브는 구조적으로 탄소와 탄소(C-C)간의 강한 결합을 이루고 있어 매우 높은 강도를 나타낸다. 탄소나노튜브의 기계적 물성에 대한 다수의 연구결과, 탄소나노튜브의 영률은 5.5Tpa에 이르며 인장강도는

100Gpa에 이르는 것으로 보고되고 있다. 이는 고강도 합금의 영률이 200Gpa, 인장강도 1 ~ 2Gpa인 것과 비교하여 매우 높은 기계적 물성을 나타내는 것이다. 또한 탄소나노튜브의 열전도도는 지금까지 알려진 최고의 열전도체인 다이아몬드 보다 두 배나 큰 열전도도를 나타낸다. Table. 1에 단일벽 탄소나노튜브와 다중벽 탄소나노튜브의 성질을 비교하였다..

탄소나노튜브는 입자의 직경, 길이, 키랄성(chirality)에 따라 다양한 물리적 특성을 갖는다. 아래의 내용에 본 연구에서 주로 다룰 탄소나노튜브의 열적성질을 서술해 보았다.

Table 1. General Property of Carbon Nanotubes

Property	SWCNT	MWCNT
Diameter(nm)	0.5 ~ 3.0	5 ~ 100
Length(μm)	5 ~ 20	10 ~ 20
Tensile strength(Gpa)	~ 100	< 50
Young's Modulus(Tpa)	5.5	0.4 ~ 3.7
Bulk density(g/cc)	0.01 ~ 0.03	0.1
True density(g/cc)	1.33 ~ 1.4	1.4 ~ 2.6
Resistivity($\Omega\cdot\text{cm}$)	1.0×10^{-4}	$5.1 \times 10^{-4} \sim 5.86$
Current density(A/cm^2)	$\sim 10^9$	-
Field emission, Turn-on Voltage($\text{V}/\mu\text{m}$)	0.7 ~ 2	1 ~ 5
Thermal conductivity($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	Max. 6000	Max. 3000

1.3.1 열적 성질

탄소나노튜브의 열전도도는 온도와 Phonon의 평균자유경로에 의존한다. Hone 등은 1999년 탄소나노튜브의 열전도도가 온도에 일차적인 관계식을 가짐을 발표하였으며, 7 ~ 25K의 온도 범위에서는 직선관계, 25 ~ 40K의 범위에서는 직선의 기울기가 증가하고, 상온이상에서는 온도가 증가함에 따라 단조증가함을 보고

하였다.[J. Hone et al, 1999.] Hone등은 상온에서 SWCNT에 대한 열전도도가 1,800 ~ 6,000W/m·K의 범위에 존재하는 것을 제시 하였다. 1999년 Goddard 등은 나노튜브의 열전도도가 인가전류가 증가함에 따라 2,980W/m·K에 접근함을 수치적으로 계산하였다. 2000년 Tomanek 등은 탄소나노튜브의 열전도도와 온도의 상관관계를 연구 하였으며, 특히 Hone 등이 제안했던 상온에서의 열전도도가 6,600W/m·K인 아주 높은 값을 재확인하였고, 이 값이 Phonon의 평균 자유경로가 아주 큰 것에 기인하는 것을 이론적으로 입증하였다. 그러나 Barber등은 열전도도의 온도에 대한 상관관계가 선형적이기 보다는 다른 특성을 갖는다고 주장 하였는데, 즉 100K의 온도까지는 37,000W/m·K인 최대치까지 증가하다가 400K 부터는 3,000W/m·K로 급격히 감소한다고 보고 하였다.[S. Berber et al, 2000]

1.4 탄소나노튜브의 분산 방법

탄소나노튜브는 흑연 판 사이의 상호작용과 유사하게 튜브와 튜브간의 강한 반데르발스의 힘으로 인하여 다발이나 응집체 형태로 존재한다. 이러한 응집 현상은 전기적 물성이나 기계적 물성을 향상시키는 목적의 나노유체를 제조함에 있어서 방해가 된다. 작동 유체 내에서 탄소나노튜브가 가능한 각각의 탄소나노튜브 입자로 분산되지 않으면 탄소나노튜브의 장점을 발휘 할 수 없다. 따라서 탄소나노튜브의 분산시키는 기술은 나노 유체 제조에 있어서 가장 중요하다. 탄소나노 튜브를 유체 내에 안정적으로 분산하기 위한 방법으로는 다음과 같이 초음파를 이용한 기계적 분산법, 계면 활성제나 고분자 화합물을 이용한 물리적 흡착에 의한 분산법, 강산을 이용한 화학적 개질에 의한 분산법이 있다.

1.4.1 초음파를 이용한 기계적 분산법

알콜과 같은 용매에 탄소나노튜브를 혼합하고 초음파(Ultrasonic)를 쏘아 분산시키는 가장 단순고 일반적인 방법이다. 하지만 초음파 처리 시, 외부 벽부터 내부 벽 방향으로 탄소나노튜브의 손상이 진행되며, 이때 탄소나노튜브의 길이와 두께가 감소한다.

또한 아크방전법 등으로 만든 탄소나노튜브는 흑연, 비정질탄소, 흑매금속 등 많은 불순물들이 포함되어 있는데, 초음파 이용 시 탄소나노튜브와 강하게 흡착된 위와 같은 불순물을 제거하는데 아주 효과적이다.

1.4.2 계면활성제, 고분자화합물을 이용한 물리적 흡착에 의한 분산

(1) 용매와 분산제를 이용한 분산

계면활성제를 이용하면 탄소나노튜브가 용액 상에서 안정적으로 분산될 수 있다. 계면활성제의 역할은 탄소나노튜브 표면에 효과적으로 코팅되어 정전기적 반발력이나 Steric 반발력을 유도하여 분자간의 힘인 Van der Waals 인력을 극복하는 것이다. 계면활성제 사용은 탄소나노튜브의 고유 특성을 유지시키며, 분자단위의 단위소자 등 다양한 응용분야에서 탄소나노튜브를 적용하기 위한 용액을 다루는 것에 매우 유용한 장점을 제공하지만, 추후 공정에서 계면활성제의 제거가 큰 문제가 될 수 있으며 최대 분산농도도 약 1% 수준에 불과하다.

(2) 고분자를 이용한 분산

탄소나노튜브 입자의 nm ~ μm 수준에서의 응집현상 때문에 이 응집체를 물리적 힘에만 의존하여 분산하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 모노머 수준에서 탄소나노튜브를 혼합하여 복합체를 제조하는 방법이 탄소나노튜브의 효율적인 분산차원에서는 효과적인 방법을 제공한다. 탄소나노튜브-폴리머 복합체는 처음 Ajayan 등에 의해 보고되었다. 이들은 기계적으로 정제된 MWCNT와 에폭시 수지를 혼합하여 복합체를 제조하였다. 이후, 이들 연구의 초점은 균일성을 유지하면서 많은 양의 나노튜브를 충전할 수 있는 복합체 제조에 관심을 두기 시작했다. 탄소나노튜브-에폭시 복합체는 nonconjugated polymer를 사용한 복합체 연구에도 많이 사용되고 있다. 최근에 미국의 Zyvex사는 길이가 짧고, 골격이 단단한 기능성 conjugated polymer인 PPE(poly aryleneethylene)를 이용하여 탄소나노튜브 표면에 비공유 결합적으로 부착하여 탄소나노튜브를 분산시키는 non-wrapping 접근방식을 개발하였다.

1.4.3 강산을 이용한 화학적 개질에 의한 분산

탄소나노튜브를 초음파를 이용하여 유체 내에 분산시키는 것이 가능하지만, 탄소나노튜브 분산용액의 농도가 증가할수록 콜로이드 안정성이 감소하면서 서로 뭉치게 되어 분산안정성이 떨어지게 된다. 또한, 초음파 처리 자체가 탄소나노튜브의 표면에 큰 손상을 주게 된다. 탄소나노튜브의 표면의 기능기는 탄소나노튜브와 액체 매체 사이의 상호작용에 영향을 준다. 탄소나노튜브를 산용액에서 오랫동안 끓이거나 담가두면 촉매금속이 용해되면서 제거되고, 공기나 산소분위기에서 350 ~ 400℃의 열처리온도에서 열적 산화를 통해 비정질탄소 혹은 탄소입자가 제거된다. 산화과정을 통해 탄소나노튜브가 절단이 될 수 있으며, 특히 구조적으로 결함이 발달된 위치에서 절단현상이 쉽게 발생한다. 질산이나 황산 등의 혼합산을 이용하여 탄소나노튜브의 팁부분과 표면에 화학적으로 산화시킴으로써 $-C=O$, $-COOH$, $-OH$ 등의 산소를 함유하는 기능기가 도입된다. 이때, 수용액상에서 탄소나노튜브는 이와 같은 산 기능기 도입을 통해 물 분자와의 인력이 증가하고, 탄소나노튜브는 음으로 대전되면서 정전기적 반발력이 생성된다. 이로 인해 침전 현상이 발생하지 않고 안정된 탄소나노튜브 분산 용액을 얻을 수 있다. 산처리 과정에서 open tip 이 형성될 수도 있으며, 이와 같은 처리를 통해 탄소나노튜브는 수용액이나 알콜 류의 용액에서 정전기적으로 안정한 용액을 형성할 수 있다.

2. 열음향 레이저(Thermoacoustic Laser)

2.1 음파의 주기적인 파동(Periodic Waves)

손으로 한쪽 면이 고정된 줄을 위아래로 단 한 번만 흔들면 그 줄에 횡 방향의 힘이 가해진다. 그 결과는 펄스라 불리는 단순한 ‘구불거림(Wiggle)’이 줄을 따라 이동하게 되는 것이다. 파동이 지나갔을 때 줄의 장력은 줄을 직선 모양으로 복구시켜 준다.

줄의 한 끝을 반복적, 주기적으로 운동시키게 되면 줄의 각 입자들은 모두 파동이 전달될 때 주기적 운동을 겪게 된다. 이를 주기적인 파동이라 한다.

2.1.1 주기적 횡파

줄을 진폭 A , 진동수 f , 각진동수 $\omega = 2\pi f$, 주기 $T = 1/f = 2\pi/\omega$ 의 단순 조화 운동으로 아래위로 흔든다고 가정하면 그 결과로 만들어지는 파동은 마루와 골이 대칭적으로 반복되는 파동이다. 단순 조화 운동의 주기파는 분석이 아주 쉬운데 이를 사인파라고 한다. 어떤 주기적 파동도 이러한 사인파의 조합으로 표현될 수 있다고 알려져 있다.

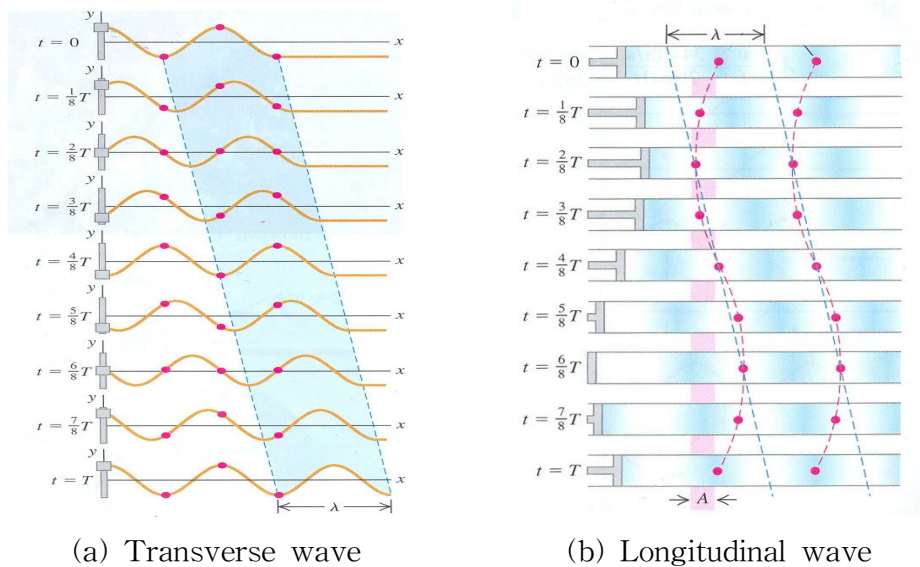


Figure 2 Periodic waves

Figure. 2 (a)는 줄을 따라 진행되는 파동은 사인파 요동이 연속적으로 이어지는 것이다. 줄의 왼쪽 끝 부분의 모양을 1/8주기 간격으로 한 주기 동안 나타낸 것이며 파동 모양은 그림에서 진한 부분으로 표시한 것과 같이 오른쪽으로 안정되게 이동한다. 파동이 진행할 때 그림에서 붉은 점으로 표시한 것과 같이 줄 위의 각 지점은 평형 점에 대하여 위아래로 단순 조화 운동을 한다. 즉, 사인파가 매질을 지나갈 때, 파동의 각 지점은 같은 진동수로 단순 조화 운동을 하는 것을 의미한다.

특정한 순간에서 주기적 파동의 모습은 동일 형태의 반복이다. 완전한 한 파동형태의 길이는 한 마루에서 다음 마루까지의 거리, 또는 한 골에서 다음 골까지, 또는 파동 모양의 어느 한 지점에서 다음의 동일한 지점까지의 거리이다. 이를 파장(λ)이라 부르고, 일정한 속도 v 로 움직이는 파동은 한 주기 T 라 부르는 시간 동안 한 파장 λ 만큼 진행한다. 파동의 속도는 $v = \lambda T$, 또는 $f = 1/T$ 이므로 다음과 같다.

$$v = \lambda f \text{ (주기적 파동)} \tag{1}$$

전파 속력은 파장과 진동수의 곱이 된다. 여기에서 줄의 모든 지점은 동일한 진동수 f 로 진동하기 때문에, 진동수는 파동 전체에 대한 특성이 된다.

2.1.2 주기적 종파

Figure. 2 (b)와 같이 한쪽에 피스톤이 달려있고 액체로 채워진 좁은 관을 고려하면, 피스톤을 밀어 넣을 때, 그 부근의 액체가 눌리고, 이 지역의 압력이 증가한다. 이 지역은 인접한 지역의 액체를 밀어내고, 이 과정이 계속되면서 펄스파가 관을 따라 이동한다.

이 피스톤을 관의 축 방향을 따라 단순 조화 운동으로 계속 앞뒤로 밀고 당긴다고 가정하면 이 운동은 액체에서 압력과 밀도가 평형 상태보다 커지거나 작아지는 지역을 형성한다. Fig. 8.(b)에서 어둡게 표시된 지역이 밀한 지역이고, 밝은 부분이 소한 지역이다. 파장은 밀한 지점 한 곳에서 다음 밀한 지점까지, 또

는 소한 지점에서 다음 소한 지역까지의 거리이다. 또 횡파와 마찬가지로 액체 관을 따라 전파되는 파동을 1/8주기로 나타낸 것을 알 수 있다. 밀과 소의 형태가 오른쪽으로 안정되게 이동하는데, 이는 Fig. 8.(a)의 사인파의 마루와 골이 이동하는 형태와 같다. 그리고 주기적인 횡파의 사인파처럼 주기적인 종파도 한 주기 동안 한 파장 λ 만큼 우측으로 이동하기 때문에 기본 방정식 $v=f\lambda$ 는 종파의 경우도 횡파와 마찬가지로 성립하게 된다.

2.2 음향파의 발생

모든 물체는 자신의 고유한 진동수를 가지고 있다. Sondhauss 튜브에서 보면 공기입자들이 진동을 하게 되며, 공기입자들은 이에 따라 다양한 범위의 진동수를 갖는 사인파를 생성한다. 그리고 한쪽 끝이 닫힌 튜브는 $L=\lambda/4(f=v/4L)$ 에 의해 $1f, 3f, 5f, 7f...$ 등의 진동수를 갖는 정규모드를 가지고 있다. 하지만 본 실험에서의 열원이 계속적으로 변화하는 힘을 가해주고 있기 때문에(이를 강제 진동이라고 함) 이러한 강제진동의 구동진동수 f 가 정규모드 중의 하나에 가깝게 되면 튜브 안의 공기가 그 정규모드로 진동할 것이고, 진폭은 상당히 커질 것이다. 따라서 음향파의 Power 즉, 음압이 증가하게 되고 이를 공명이라고 한다. 이러한 공명 현상 때문에 소리(음향파)가 발생하게 되는 것이다.

강제력의 진동수가 정확히 한 정규모드의 진동수와 같으며 계가 공명을 일으키고, 강제 진동의 진폭이 최대가 된다. 마찰력이나 에너지를 소진시키는 요인이 없으면 정규모드와 같은 진동수의 강제력은 계에 에너지를 계속해서 더할 것이고, 진폭은 끝없이 커질 것이다(정규모드(nf)가 계속 증가함에 따라 계속 최대 진폭이 커짐). 그러나 실제의 계에서는 항상 에너지가 소멸되거나 감쇠된다. 따라서 공명이 일어날 때의 진폭이 아주 클 수는 있지만 무한히 커지지는 않는다.

조개껍데기, 병, 포도주 잔들도 물체마다의 정규모드가 있고 예를 들어 포도주 잔의 정규 모드와 성악가의 다양한 진동수에 의해 진동수가 일치하게 되면 진폭이 매우 큰 진동이 형성되어 잔이 깨지게 된다[Hugh D. Young, 2008].

2.3 파동방정식(Wave equation)

일반적으로 음파는 유체 내의 압력 교란에 의하여 파의 진행 방향으로 매질이 전진과 후퇴를 반복하는 압축과 팽창의 반복현상이다. 따라서 음파의 전파에 관련되는 복원력은 매질의 압축과 팽창에 의한 압력 변화에 기인한다. 즉 음파에 의한 압력 교란 p 는 밀도변화 ρ 와 매질의 입자 속도 u 를 수반한다. 음파가 없을 때 평균 압력 p_0 , 평균밀도 ρ_0 , 평균 유속 u_0 라 하면 음파가 전파할 때 압력, 밀도 및 입자 속도는

$$p_T = p_0 + p \quad (2)$$

$$\rho_T = \rho_0 + \rho \quad (3)$$

$$u_T = u_0 + u \quad (4)$$

로 표시된다.

매질 내의 음파를 기술하기 위해서는 매질의 상태 방정식이 필요하다. 음파는 짧은 시간에 매질의 압축 상태로 변화시키기 때문에 등 엔트로피 변화를 유발시킨다. 이때 실제 기체의 상태방정식은

$$\left(\frac{p_T}{p_0}\right) = \left(\frac{\rho_T}{\rho_0}\right)^\gamma \quad (5)$$

로 표시된다. 이것을 테일러급수로 전개하여 밀도의 1차항만 취하면

$$p_T = p_0 + \left(\frac{\partial p_T}{\partial \rho}\right)_{\rho_0} (\rho_T - \rho_0) \quad (6)$$

한편 음파의 진행에 따라 공간상 특정 위치의 체적 요소에 질량의 유입과 유출이 발생한다. 이때 질량의 유입률은 밀도의 증가율과 같아야 하기 때문에 연속

방정식

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial \rho} + \nabla \cdot (\rho_T u_T) = 0 \quad (7)$$

을 만족하여야 한다. 작은 체적 요소를 고려할 때 유체의 점도 때문에 이상적인 단열 압축 과정이 이루어지지 않으며 음파는 에너지 손실을 겪게 된다. 우선은 열전도에 의한 손실과 점도에 의한 손실을 무시하고, 비점도성 이상유체를 가정하면, 작은 체적 요소에 작용하는 힘의 평형 조건은 다음과 같다.

$$\nabla p_T + \rho_T \left[\frac{\partial \rho_T}{\partial \rho} + (u_T \cdot \nabla) u_T \right] = 0 \quad (8)$$

위에서 도입한 식(13)~(15)를 정리하여 각 종속 변수에 대한 단일 미분 방정식을 유도할 수 있다. 이것이 음파의 파동 방정식들이다. 매질의 유동이 없고 음압이 낮아서 음파의 변수들이 평균 상태변수에 비하여 극히 작은 경우 식(13)~(15)의 1차 미분 항을 취하면

$$p = \left(\frac{\partial P_T}{\partial \rho} \right)_{\rho_0} \rho \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} + \rho_0 \nabla \cdot u = 0 \quad (10)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (11)$$

를 얻는데, 이들을 연립시켜 각 음파 변수에 대한 미분 방정식을 구하면

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (12)$$

$$\nabla^2 u = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (13)$$

$$\nabla^2 \rho = \frac{1}{c_o^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \quad (14)$$

과 같은 선형 파동방정식들을 얻는다. 여기서 음파의 전파 속도는

$$c_o^2 = \left(\frac{\partial p_T}{\partial \rho} \right)_{\rho_o} \quad (15)$$

이며 식 (17)의 관계로부터

$$c_o^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \quad (16)$$

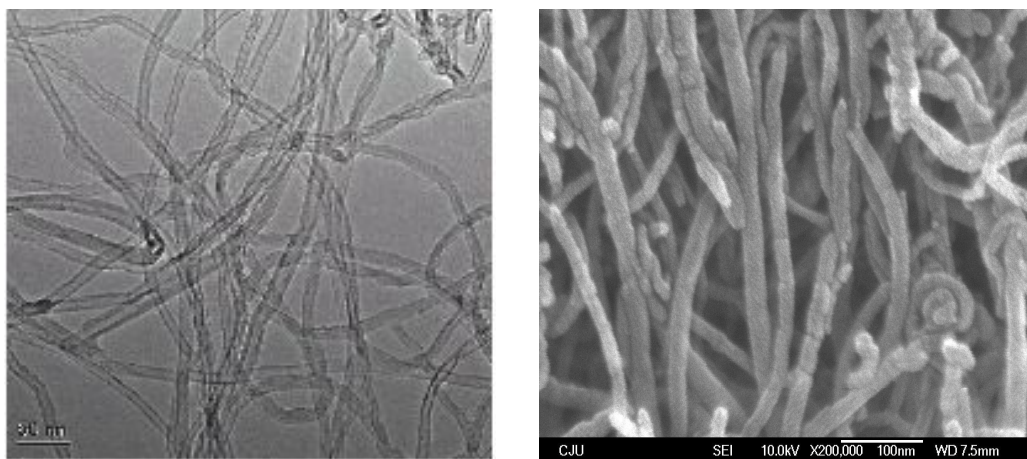
임을 알 수 있다. 전파에 따른 음파의 에너지 손실을 고려치 않을 경우 전파 속도 c_o 는 주파수에 무관한 상수다[윤석왕, 2003].

Ⅲ. 나노유체의 특성

1. 탄소나노튜브 및 기본유체

본 연구에서 사용된 탄소나노튜브는 한국의 한화나노텍에서 화학증기증착법 (Chemical vapor deposition)으로 제조된 것으로서 순도 95% 이상의 다중벽 탄소나노튜브(Multi walled carbon nanotubes, CM-100)를 산화 처리하여 사용하였다. Figure 3에 산화 다중벽 탄소나노튜브 CM-100의 SEM 사진을 나타내었으며, Table 2에 물성치를 나타내었다. 그림을 보면 확인 할 수 있듯이 탄소나노튜브는 길이 방향으로 긴 튜브형태를 가지며 여러 개의 탄소나노튜브가 서로 응집되어 거대한 응집체를 이루고 있음을 볼 수 있다. 이렇게 복잡하게 엉켜있는 탄소나노튜브 입자를 잘 분리시켜 기본유체에 균일하게 분산할 수 있어야 나노유체의 우수한 열전달 성능을 효과적으로 이용할 수 있을 것이다.

또한 나노유체를 제조하기 위해서 사용된 유체는 자동 증류수기(ADA-04)를 이용하여 1번 증류한 증류수와 순도 99.99%의 에탄올을 기본유체로 사용하였다. 300K에서 물의 열전도도는 $0.613\text{W/m}\cdot\text{K}$ 이며, 에탄올의 열전도도는 $0.171\text{W/m}\cdot\text{K}$ 이다.



(a) CM-100

(b) Oxidized CM-100

Figure 3 SEM Photos of Carbon nanotubes

Table 2. Properties of OMWCNTs (Oxidized CM-100).

Properties	Oxidized CM-100
Diameter(nm)	10~15
Length(μm)	~200
Purity(wt.%)	95
Bulk Density(g/cm ³)	0.05
Surface Area(m ² /g)	225

2. 나노유체의 제조

2.1 화학적 분산 방법(강산에서의 분산)

강산을 이용한 산화 처리 방법은 탄소나노튜브의 흑연 구조 고유의 극성을 변화시켜 나노 입자간의 반데르발스 힘을 약화시킴으로써 분산이 효과적으로 이루어질 수 있도록 만들어 준다. Figure. 5는 산화 처리 된 탄소나노튜브를 제조하기 위한 실험 장치이며, 그 제조방법은 다음과 같다.

먼저 황산(98%) 8ml와 질산(63%) 22ml를 혼합하여 제조된 용액 30ml에 MWCNT 2g을 넣은 후 110°C에서 24시간 동안 교반 하였다. 교반 후 생성된 카르복시기를 함유하는 산성 MWCNT를 탈 이온화된 물 1000ml와 섞어서 희석하여 pH 7이 될 때까지 세척과 여과의 과정을 반복하였다. 사용된 여과기는 감압 여과용 필터 홀더(KGS-47)를 사용하였고, 여과지는 어드벵텍사의 공극의 크기가 0.2 μm 인 친수성 PTFE 타입의 멤브레인 필터(H020A047A)를 사용하였다. 그런 다음 여과된 MWCNT를 60°C의 진공 건조오븐에서 48시간 정도 진공 건조하여 수분을 제거하여 산화 처리 된 MWCNT를 1.7 g을 획득하였다. 그 후, 산화 처리 된 탄소나노튜브의 체적분율을 변화시켜 나노유체를 제조하였다.[Shim et al, 2006.]

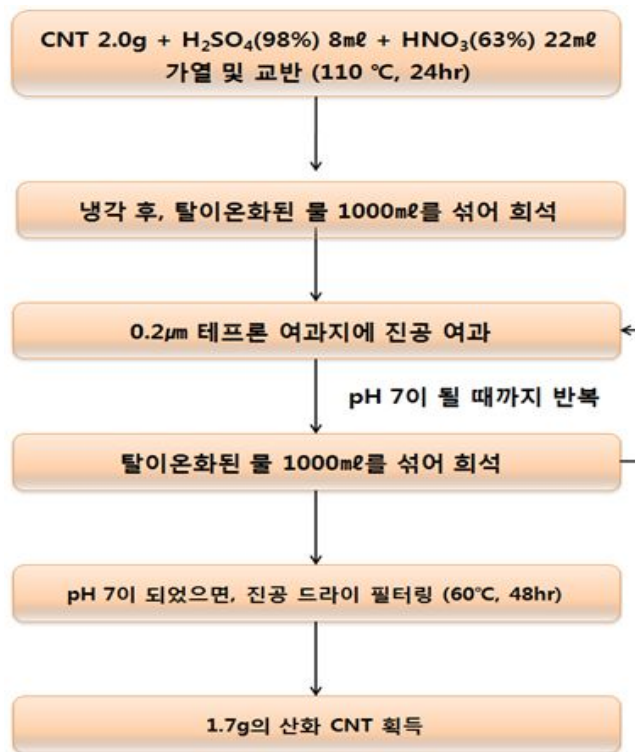


Figure 4. The oxidation process of Carbon nanotubes

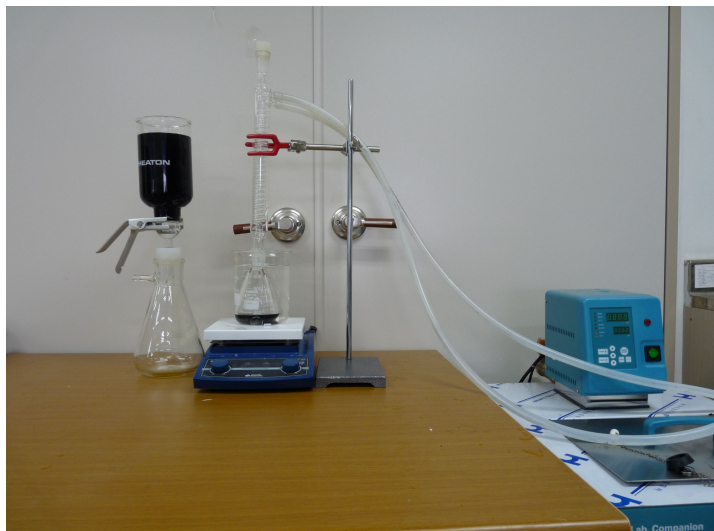


Figure. 5 The experimental apparatus of produce oxidation MWCNTs.

2.2 기계적 분산 방법(초음파 분산)



Figure. 6. The ultrasonic dispersing(VC-505).

나노유체를 제조하기 위해 사용한 초음파 분산기는 영진코퍼레이션 사의 500watt급의 초음파 분산기인 VC-505를 사용하였다. 이 초음파 분산기는 20kHz를 초음파를 발생하고, 직경 13mm stainless Probe를 장착하여 사용한다. 초음파는 Crystal과 같은 물질에 압력을 주면 전기파를 발생하고 전기파를 받으면 진동을 하는 특징이 있는데 이러한 특징을 압전성 이라 하고, 이 압전성 특성을 가지는 crystal과 같은 물질에 초당 20,000 번의 전기적 충격을 가하면 crystal 은 초당 20,000 번의 진동을 하게 되며 이 진동을 스테인레스 프로브를 이용하여 증폭시키면 20KHz의 초음파가 발생한다. VC-505를 이용하여 초음파를 액체 속으로 발사하면 초음파의 각 파동에 따라 용액내부에 파동이 생기는데 하나의 파동이 생겨 앞으로 나가면 나가는 방향으로 정압이 생기고 그 바로 뒤편으로는 부압이 발생한다. 부압이 발생한 부위에는 기포 형태로 된 수백만 개의 미세공간이 순간적으로 생성된다. 이 미세공간이 순간적으로 융합하여 크기가 커지기도 하나 바로 뒤이어 따라오는 또 다른 초음파 파동의 정압에 의해 격렬하게 파쇄 되게 된다. 미세공간이 생성되어 파쇄되기까지는 수밀리초에 불과하지만 이 미세공간이 파쇄 될 때에는 물의 격한 흐름, 소용돌이 등의 현상에 의해 강한 충격파가

발생한다. 이러한 충격파가 용액의 작은 부분에서 수백만 개가 발생하면 이 충격파에 의한 에너지는 최대 100,000 atm에 이를 정도로 어마어마하게 된다. 이 충격파의 에너지를 이용하여 탄소나노튜브를 수용액 속에 분산 시킨다.

3. 나노유체의 열전도도 측정방법

3.1 비정상열선법

나노유체의 열전도도를 측정하기 위해서는 유체의 열전도율을 가장 정밀하게 측정하는 것으로 알려 졌진 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 주로 사용한다. 본 연구에서는 Nagasaka에 의해 제시된 비정상 열선법을 이용한 전기 전도성 유체의 열전도도 측정방법에 따라 측정하였다.[Nagasaka et al, 1983.]

3.2 열전도도 측정장치

3.2.1 휘트스톤 브릿지

휘트스톤 브리지는 다음 Figure. 7과 같이 대칭으로 설치된 4개의 저항과 중앙의 검류계로 구성되어 있으며, 전압을 가해줘서 발생하는 전압강하로 정밀저항을 측정하는 회로이다.

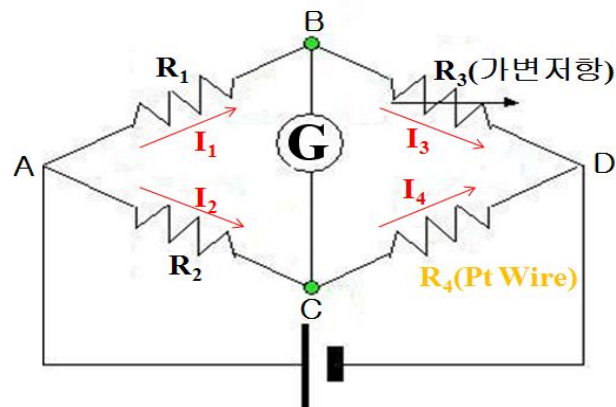


Figure. 7 Diagram of Wheatstone Bridge.

$$\begin{aligned}
 V_B &= V_C, V_{AB} = V_{AC}, V_{BD} = V_{CD} \\
 I_1 \cdot R_1 &= I_2 \cdot R_2, I_3 \cdot R_3 = I_4 \cdot R_4 \\
 I_1 &= I_3, I_2 = I_4 \\
 R_1 \cdot R_4 &= R_2 \cdot R_3 \\
 R_4 &= \frac{(R_2 \cdot R_3)}{R_1} \tag{1}
 \end{aligned}$$

휘트스톤 브리지에 검류계가 접속된 중간지점에 전압이 같아지면 전위가 0이 되어 전류는 흐르지 않아 검류계는 중간을 지시한다. 이 때, 전위는 평형이 되었다고 볼 수 있다. 저항의 전압강하는 저항에 비례하여 발생하므로 저항의 비례는 전압의 비례가 되므로 이를 이용하여 미지의 저항을 구한다. 마주보는 저항을 서로 곱한 값은 같다. 그러므로 식 (1)을 이용하여 미지의 저항 R_4 (Pt wire)를 계산할 수 있다.

Figure. 8, 9는 본 실험에 사용된 휘트스톤 브리지의 개략도와 실험 장치의 사진이다. 10Ω , $10K\Omega$ 의 저항과 $10K\Omega$ 의 가변저항, 그리고 테프론으로 코팅된 직경 $76\ \mu\text{m}$, 길이 $15\ \text{cm}$ 백금선을 사용하여 휘트스톤 브리지를 제작하였다.

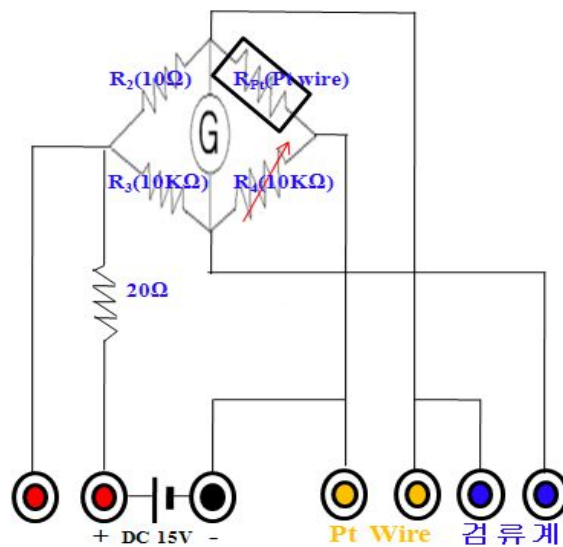


Figure. 8. Diagram of wheatstone bridge experimental apparatus.

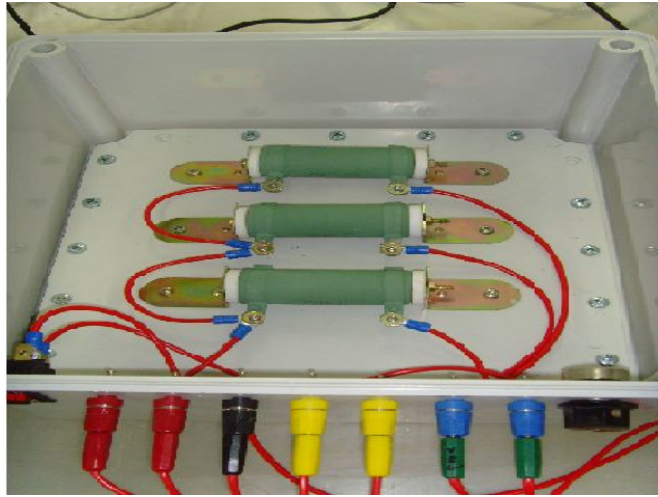


Figure. 9. Photograph of wheatstone bridge experimental apparatus.

3.2.2 백금선

본 실험에서 사용된 백금선은 Figure. 10과 같이 직경 $76(\mu\text{m})$, 길이 150mm의 백금선을 사용하였다. 백금선에서 축 방향으로 전도가 생기게 되어 열의 누설이 생기게 되지만, 본 실험에서는 직경에 대한 길이의 비가 약 2400배 정도 되기 때문에 축방향의 열전달은 무시 할 수 있다.

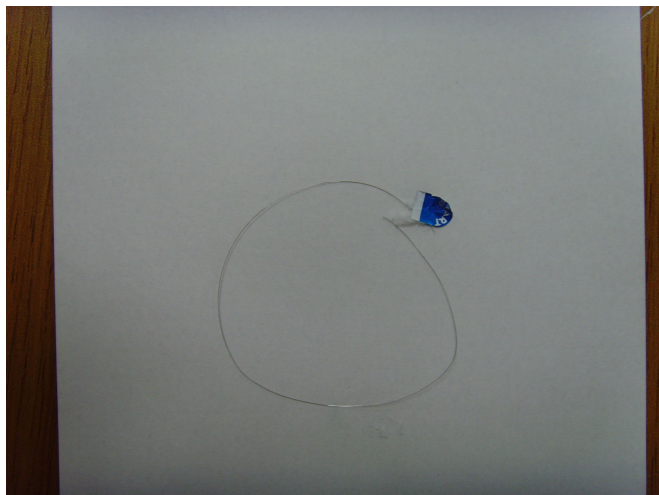


Figure. 10. Photograph of Platinum wire

3.2.3 데이터로거

본 실험에서는 검류계 대신 데이터 수집을 위한 Agilent사의 34970A를 사용하였다. 34970A는 6½ 디지털 DMM을 내장한 3슬롯 메인프레임으로 이루어져 있고, 내장형 GPIB와 RS-232인터페이스, 전압, 온도를 측정할 수 있는 20개의 채널과 전류를 측정할 수 있는 2개의 와이어 채널이 내장되어 있으며 초당 최대 250채널 스캐닝이 가능하다. 34970A를 사용하여 휘트스톤 브리지에 걸리는 전압 측정과 검류계에 걸리는 전압 측정, 그리고 나노유체를 담은 실린더의 온도를 측정하였다.

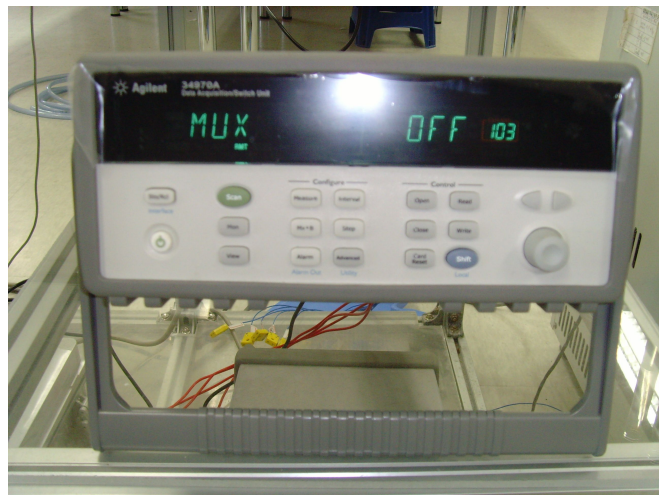


Figure. 11. Photograph of Data logger(34970A).

3.2.4 전원공급장치

파워 서플라이는 20V까지 조절 가능한 Agilent의 E3648A를 사용하였다. E3648A는 단일 및 듀얼 출력 전원을 공급하며, 벤치탑 및 시스템 사용을 위한 소형의 콤팩트 크기, 낮은 출력 리플 및 노이즈, 내장 측정과 기본 프로그래밍 가능 기능을 제공한다.



Figure. 12. Photograph of DC Power supply(E3648A).

3.2.5 항온수조

나노유체의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 제이오 테크사의 저온 항온 수조인 RBC-30을 사용하였다. 수조의 용량은 30ℓ 이고 온도 범위는 $-25^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$ 까지 조절 가능하다. Bath내에 강력한 외·내부 순환 펌프를 장착하여 온도 분포의 정밀도가 좋고, 펌프 용량은 25LPM이다.



Figure. 13. Photograph of bath circulator.

3.3. 열전도도 측정

실험 방법은 백금선을 측정 대상 유체에 완전히 잠기게 한 후 대상 유체의 온도와 항온수조의 온도가 평형이 된 후 실험을 수행하였다. 나노유체와 수조의 온도가 평형이 된 후, 10 kΩ의 가변저항을 적절히 조절하여 검류계에 걸리는 전압을 0으로 만든 후, 회로에 15 V의 전압을 인가시키면 백금선의 저항에 의해 열이 발생하며 발생한 열이 백금선 표면의 온도를 변화시켜 백금선의 저항을 변화시키게 된다. 이러한 백금선 저항의 변화로 걸리게 되는 전압을 데이터 로거를 통하여 측정하고 저장하게 된다. 백금선의 전기 저항과 온도는 선형적인 관계이며 이 선형식에 대해서는 선행연구에서 잘 알려져 있다. 선형적인 관계식으로부터 구해진 온도는 비정상 구간에서 로그 시간 축에 대해 선형적인 관계를 가지게 되고, 측정된 온도-시간 관계 곡선에서 다음과 같은 식을 이용하여 나노유체의 열전도도를 계산하였다.

실험은 유체 온도를 일정하게 유지하여, 실시하였고 실험의 정확도를 위해서 각각의 경우마다 동일한 조건하에서 10번 이상 반복 실험하였다. 이와 같이 측정된 전압과 휘트스톤 브리지의 원리를 이용하면 백금선의 저항을 계산해 낼 수 있다. 여기서 Bentley가 제시한 다음 관계식을 이용하였다.[Bentley, 1984]

$$E_{th} = V_s \left(\frac{R_{Pt}}{R_{Pt} + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (2)$$

E_{th} : Galvanometer에 걸리는 전압

V_s : 공급전압

식 (2)에서 계산된 저항값을 백금선의 온도-저항 관계를 이용하여 계산된 열선의 저항을 백금선의 표면의 온도로 변환 시킬 수 있다. 백금선의 온도-저항계수(α)로 Bentley가 제시한 0.0039092 /°C를 사용하였다.

$$R = R_0(1 + \alpha T) \quad (3)$$

α : 0.0039092/°C (백금선의 온도 - 저항 계수)

여기서 R은 백금선의 온도 T에서의 저항이며, R₀는 0°C에서의 백금선의 저항을 나타낸다.

계측기의 noise등의 외부 요인이 측정 데이터에 영향을 주기 때문에 변환된 데이터값 중에서 선형성이 우수한 구간을 선택하였다. 실제 온도-시간의 데이터는 비선형적이지만 시간 축을 로그스케일로 표시하면 온도 상승의 데이터가 직선으로 얻어지고 이 기울기를 환산하면 각 유체의 열전도도를 알 수 있다. 열전도도 관계식을 도출하기 위하여 원통 좌표계에서 에너지 방정식을 도입하면 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (4)$$

식 (4)를 Carslaw의 해석에 의해 시간에 따른 열선의 온도변화의 식으로 나타내면 다음과 같다.[Carslaw et al, 1959.]

$$\Delta T(a,t) = \frac{q}{4\pi K} \ln \left(\frac{4at}{a^2 C} \right) \quad (5)$$

위의 식에서 T는 시간 t에서 열선의 온도이며, q는 열선에 가해지는 전력, K는 유체의 열전도도, a는 유체의 열 확산 계수, a는 열선의 반지름, C는 상수이다. 식 (5)를 무한급수로 전개하여 열전도도에 대하여 정리하면 최종적으로 열전도도 측정 관계식은 다음의 식 (6)으로 표현 된다.

$$K = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (6)$$

여기서, K는 유체의 열전도도이며, T₁, T₂는 각각 시각 t₁, t₂에서 측정된 백금선의 온도이다. 식(6)은 식(7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$K = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{L} \frac{1}{S}, \quad S = \left(\frac{T_2(t_2) - T_1(t_1)}{\ln t_2 - \ln t_1} \right) \quad (7)$$

여기서, q 는 식(8)로 계산 할 수 있다.

$$q = \frac{I^2 R}{L}, \quad I = \frac{V_s}{(R_{trans} + R_{Pt})} \quad (8)$$

4. 나노유체의 점도 측정

점도 측정 방법에는 모세관 점도계(Capillary Visometer)법과 낙구점도계(Falling-ball Viscometer)법 그리고 회전점도계(Rotation Viscometer)법 등이 있으나, 본 실험에서는 회전점도계법을 사용하여 나노유체의 점도를 측정 하였다. 실험에 사용된 점도계는 브룩필드사의 디지털 점도계 DV II+pro이며, 회전형 점도계로서 시료속에 담긴 회전추를 일정한 속도로 회전시킬 때 발생하는 회전하는 힘을 측정하여 점도를 나타낸다. DV II+pro는 회전수를 0 ~ 200rpm까지 조절 가능하며, 이 때의 회전수를 조절하기 위한 회전추 세트와 온도를 일정하게 유지하기 위한 브룩필드사의 항온수조(TC-502), 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. 데이터의 비교를 위해 나노유체 시료속의 온도를 25℃로 일정하게 유지하여 점도를 측정하였다. 또한, 비교적 저 점도를 측정하기 때문에 저 점도용 회전추 LV-64를 사용하였고, 최대 회전수인 200 rpm으로 하여 점도 값을 측정하였다. 측정된 데이터는 시리얼 포트를 통하여 컴퓨터로 보내지게 되고, 점도계 전용 프로그램인 Rheocalc V3.0을 통하여 데이터를 저장하였다. Figure. 14는 점도 측정 장치의 전체적인 모습을 나타낸 사진이다.



Figure. 14. The measurement experimental apparatus of viscosity.

5. 실험 결과 및 결과

5.1. 나노유체의 열전도도

5.1.1 순수 기본유체의 열전도도

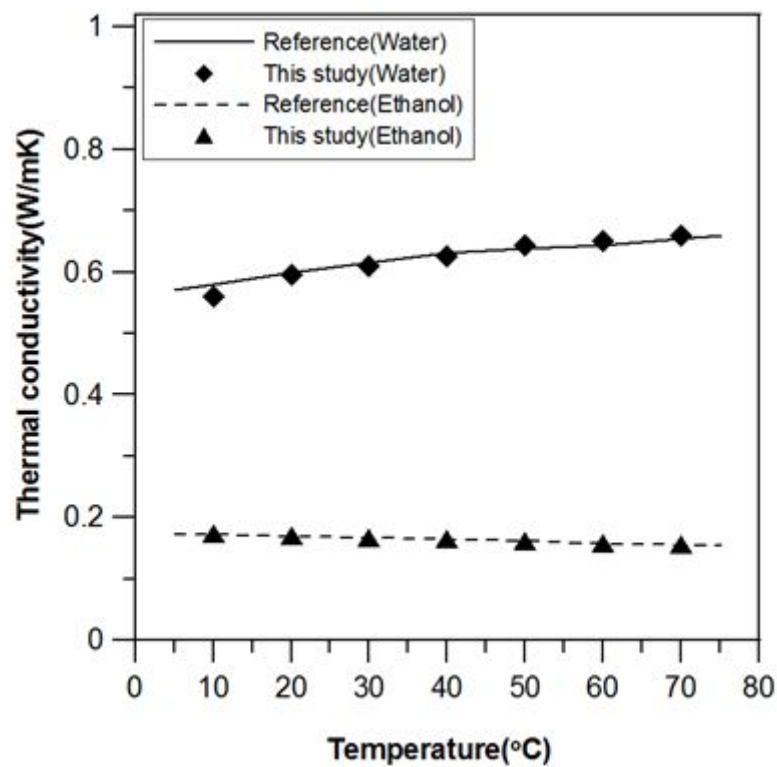


Figure. 15. Validation of water and Ethanol to measure the thermal conductivities of the base fluids

Figure. 15는 나노유체의 열전도도 측정 실험장치의 정확성을 알아보기 위해서 기존에 보고된 증류수와 에탄올의 열전도도 물성 데이터와 본 실험 장치를 이용하여 측정한 열전도도를 나타낸 그래프이다. 물과 에탄올의 열전도도 데이터는 CRC Handbook of Chemistry and Physics와 화학공학정보센터에 나와 있는 데이터를 사용하였으며, 실험 결과 문헌 값과 1% 이내의 편차로 실험 데이터가 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 실험 장치는 비교적 정확하게 만들어 졌다고 할 수 있다.

5.1.2 증류수 기반 나노유체의 열전도도

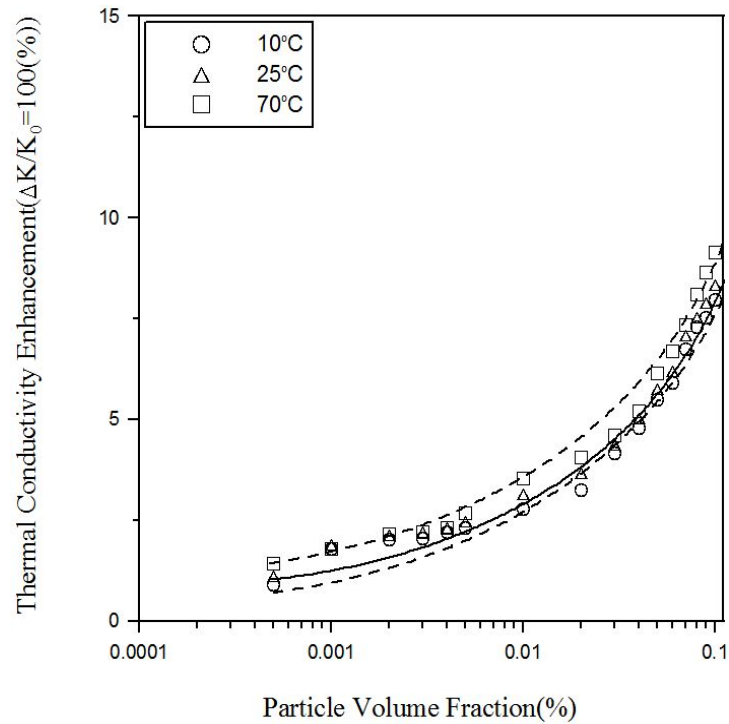


Figure. 16. Thermal Conductivity of Nanofluids based on Distilled Water

Figure. 16은 나노유체의 체적분율 0.0005 vol% ~ 0.1 vol%의 산화탄소나노유체의 열전도도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에 따라 열전도도가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 온도의 증류수 대비 열전도도의 증가폭은 70°C, 10°C, 25°C 순으로 70°C일 때 열전도도가 9.142%로 가장 높게 증가하였다. 10°C의 체적분율 0.1 vol%의 나노유체 열전도도는 증류수 대비 7.982% 증가하였으며, 25°C일 때 33.14%로 각각 증가하였다.

5.1.3 에탄올 기반 나노유체의 열전도도

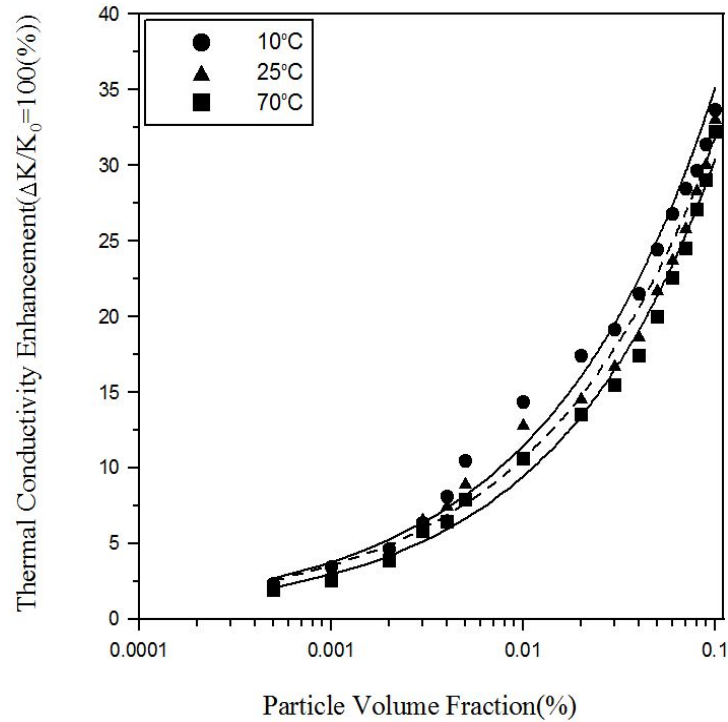


Figure. 17. Thermal Conductivity of Nanofluids based on Ethanol

Figure. 17은 나노유체의 체적분율 0.0005 vol% ~ 0.1 vol%의 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에 따라 열전도도가 비선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 기본 유체인 에탄올의 열전도도 특성과 같이 온도가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 온도의 에탄올 대비 열전도도의 증가폭은 10°C, 25°C, 70°C 순으로 10°C일 때 열전도도가 가장 높게 증가하였다. 10°C의 체적분율 0.1 vol% 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도는 에탄올 대비 33.72%로 가장 높게 증가하였으며, 25°C일 때 33.14%, 70°C일 때 32.26%로 각각 증가하였다.

5.1.4 증류수-에탄올 기반 나노유체의 열전도도

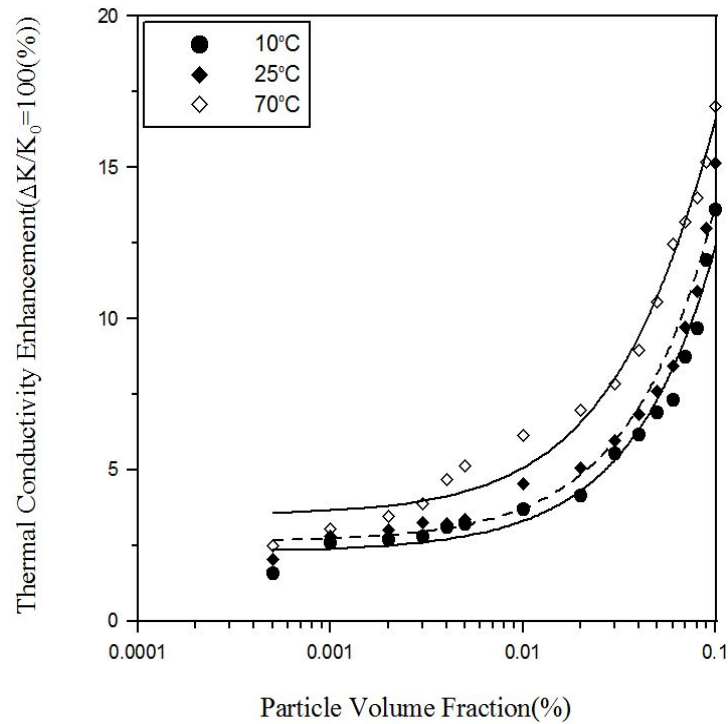


Figure. 18. Thermal Conductivity of Nanofluids based on Mixed Water-Ethanol

Figure. 18.은 나노유체의 체적분율 0.0005 vol% ~ 0.1 vol%의 물-에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 온도에 따른 물-에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 기본유체 대비 13.614%(10°C), 15.154%(25°C), 17.01%(70°C)의 향상 효과가 있었다. 앞선 실험 결과를 보면 알 수 있듯이 물-에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 물과 기반으로 한 나노유체의 열전도도 보다 높음을 알 수 있다. 이는 물-에탄올 혼합유체의 열전달 성능이 순수 물보다 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한 온도가 증가함에 따라 열전도도가 증가하는 것은 열전도도의 중요한 요인 중 하나인 브라운 운동이 활발해지기 때문으로 판단된다.

5.2. 나노유체의 점도

5.2.1 증류수 기반 나노유체의 점도

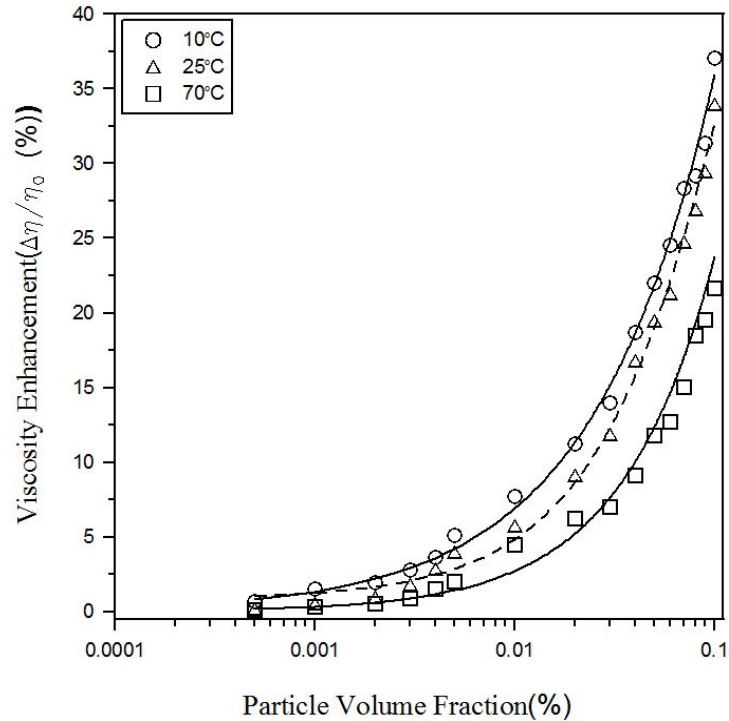


Figure. 19. Viscosity of Nanofluids based on Distilled Water

Figure. 19.은 나노유체의 체적분율 0.0005 vol%~ 0.1 vol%의 증류수를 기반으로 한 탄소나노유체의 점도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에 따라 점도가 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 온도의 에탄올 대비 점도의 증가폭은 10°C, 25°C, 70°C 순으로 10°C일 때 점도가 가장 높게 증가하였으며, 0.1 vol%의 나노유체의 경우 점도 증가율은 기본 유체 대비 37.08% 증가하였다. 또한 25°C일 때는 33.96%, 70°C일 때 21.64%로 각각 증가하였다.

5.2.2 에탄올 기반 나노유체의 점도

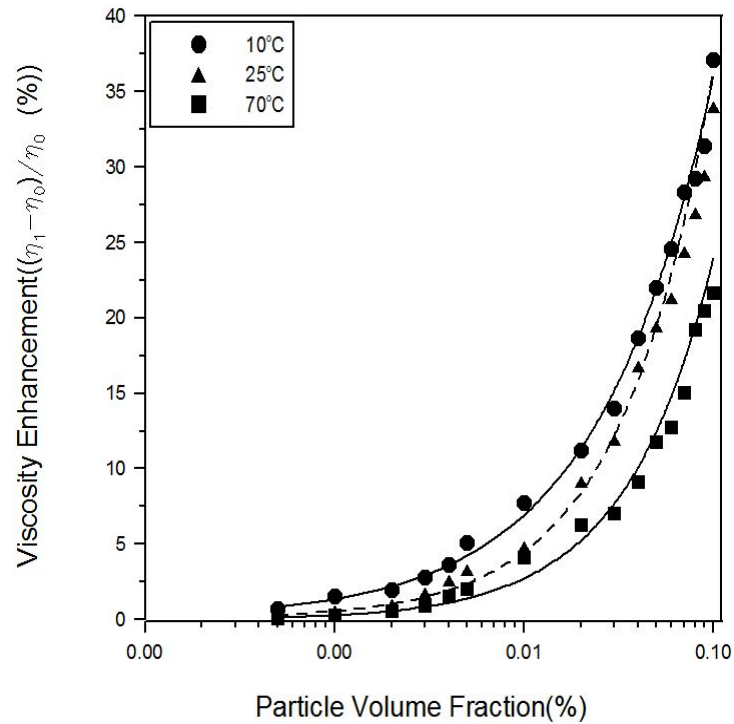


Figure. 20. Viscosity of Nanofluids based on Ethanol

Figure. 20은 나노유체의 체적분율 0.0005 vol% ~ 0.1 vol%의 에탄올-산화탄소나노유체의 점도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에 따라 점도가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 온도의 에탄올 대비 점도의 증가폭은 10°C, 25°C, 70°C 순으로 10°C일 때 점도가 가장 높게 증가하였다. 10°C의 체적분율 0.1 vol% 에탄올-산화탄소나노유체의 점도는 에탄올 대비 35.1%로 가장 높게 증가하였으며, 25°C일 때 32.14%, 70°C일 때 19.02%로 각각 증가하였다. 에탄올-산화탄소나노유체의 점도는 온도별로 평균 33% 증가하였으나, 이는 순수 에탄올의 점도가 1.074 cP 임을 감안한다면 이는 그다지 큰 증가율은 아니다.

5.2.2 증류수-에탄올 기반 나노유체의 점도

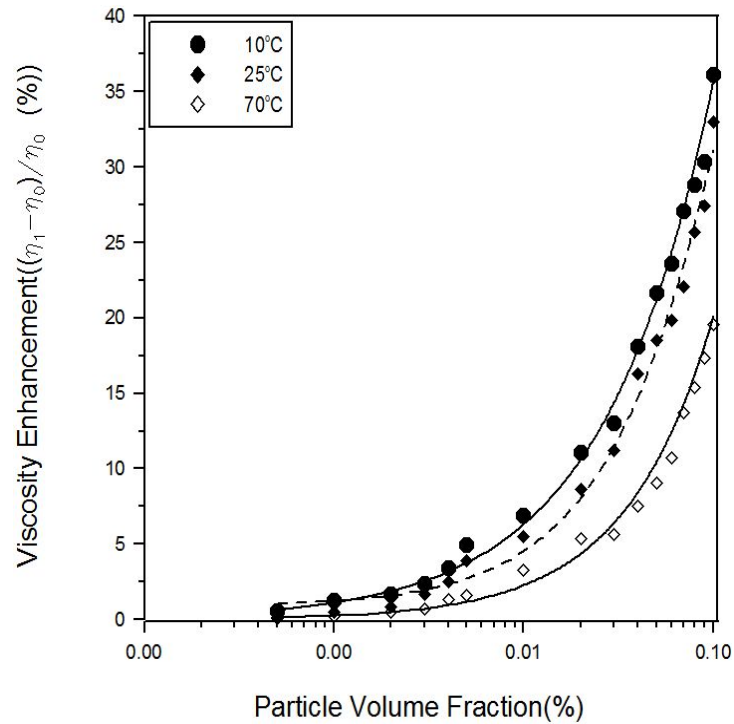


Figure. 21. Viscosity of Nanofluids based on Mixed Water-Ethanol

Figure. 21은 나노유체의 체적분율 0.0005 vol%~ 0.1 vol%의 물, 에탄올 혼합유체를 기반으로 한 탄소나노유체의 점도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에 따라 점도가 증가함을 알 수 있다. 또한 점도의 증가폭은 10°C, 25°C, 70°C 순으로 10°C일 때 기본 유체 대비 점도가 가장 높게 증가하였다. 0.1 vol%의 나노유체의 경우 점도 증가율은 기본 유체 대비 36.09%, 25°C일 때는 32.98%, 70°C일 때 19.57%로 각각 증가하였다.

IV. 열음향레이저의 특성

1. 실험 장치 및 방법

1.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 열음향 레이저 시스템은 직접적으로 전기적 에너지를 음향 에너지로 변환시켜주는 장치이다. 열음향 레이저 시스템은 공명튜브, 스택, 가열을 위한 니크롬선, 구리선, 스택의 가열면과 냉각면 온도와 실내 온도를 측정하기 위한 K타입의 열전대로 구성된다. Figure 22.는 본 열음향 레이저 시스템의 모습이다.



Figure. 22. Thermoacoustic laser system

1.1.1 스택(Stack)

스택은 열음향 레이저에서 열을 공급하고 단열재 역할을 하여 온도 구배를 높게 함으로써 음향파 발생의 효율성 향상시킨다. 따라서 열음향 레이저 시스템의 핵심요소라 할 수 있다. 스택은 단열을 고려하여 세라믹을 재질로 사용하였으며 기하학적 형태는 ‘Honey-comb’이다. 길이와 직경은 공명 튜브의 형상에 따라 변

화시켰으며 그 크기는 다음 표에 나타내었다.

Figure 23을 보면 알 수 있듯이 스택의 한쪽 면에 3mm 정도의 홈을 파서 니크롬선을 구부려 삽입하고 채널(구멍)을 통해 삽입된 구리선과 연결하여 니크롬선을 가열시켰다. 그리고 K타입의 열전대(Thermocouple)를 스택의 양쪽 면에 위치시켜 스택 주변의 가열파트, 냉각파트의 온도구배를 측정 가능 하게 하였다.

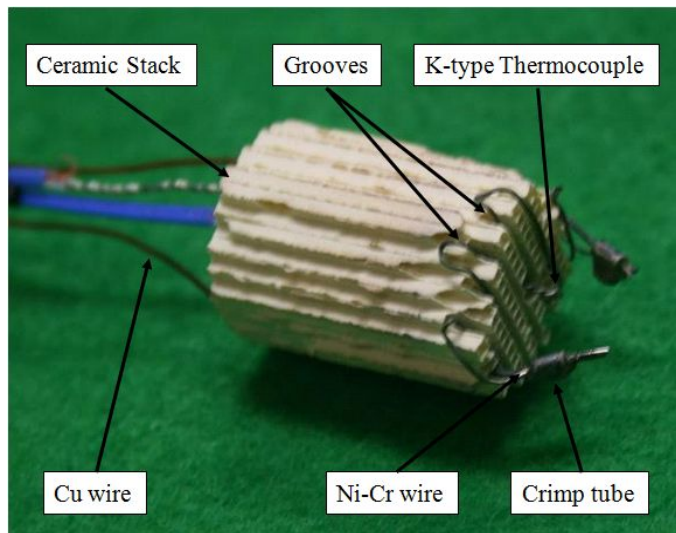


Figure 23. Photograph of a stack

1.1.2 공명 튜브(Resonance Tube)

공명 장치는 음향파가 공명하기 위해 직접적으로 정규모드를 제공하기 위해 필요하다. 그리고 음향 에너지를 저장하고 음압 또는 체적 유량(Volume flow rate)의 진폭 또는 위상을 변화시키기 위해 필요하지만 음향파위의 저항 손실을 유발한다. 따라서 공명튜브 설계의 주요 요소는 음향파위의 손실을 최소화 하는 동시에 요구되는 공명 주파수를 유지하는 것이다.

본 연구에서의 공명튜브는 강화유리인 Pyrex 튜브를 사용하였고, 한쪽 끝이 막힌 튜브로써 Sondhauss 튜브와 비슷한 형상을 하고 있다. 즉, $v/4L$ 의 기본 진동수를 가지며, 열린 면은 음향파가 발생하는 면이고 닫힌 면 부분은 현재 니크롬선 저항을 통해 가열을 시켜주고 있지만, 추후에는 집광된 태양열을 조사할 부분이다.

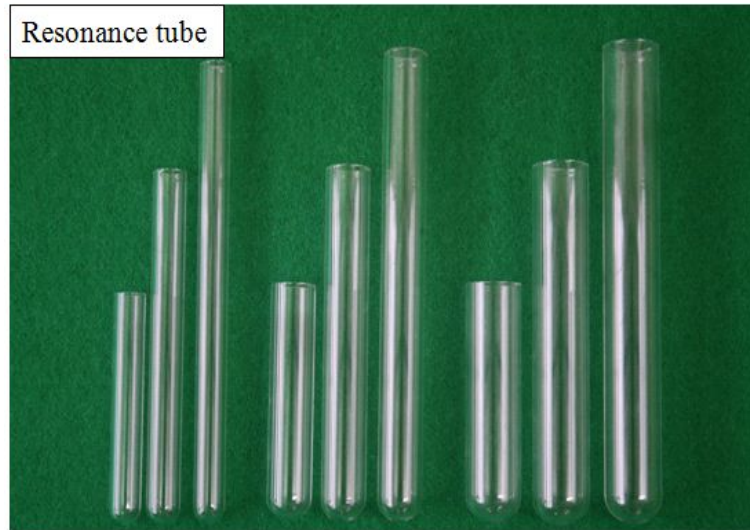


Figure 24. Photograph of a resonance tubes

1.1.3 음향과 분석기(Acoustical analyzer)

열음향 레이저(TAL)에서 나오는 음향파의 특성을 측정하기 위해 리히텐슈타인 NTI audio 사에서 개발된 AL1 Acoustilyzer를 음향파의 음압 및 주파수를 측정하는데 사용하였다.

Figure 25는 실험에 사용된 음향 분석기이며 외장 마이크는 오른쪽의 모습과 같이 막대 형태를 하고 있다. 본 기기는 다양한 음향파의 특성 측정 가능하고 휴대성이 용이하며, 비교적 오차가 적기 때문에 널리 사용되고 있다. 음압 측정 범위는 30-130dB 이고, 주파수의 측정 범위는 10Hz - 20kHz 이다. Table 4는 본 기기의 제품사양을 보여주고 있다.

(1) 음향강도(Sound Pressure Level, SPL)

사람이 들을 수 있는 음향신호의 강도는 $10^{-12}W/m^2$ 에서 $1W/m^2$ 범위에 달하기 때문에 1에서 1조에 달하는 음의 세기 등급 척도가 필요하다. 이러한 음향 강도의 척도는 10진법 지수 축척을 사용하여 가청음의 강도 구간을 12등급으로 나누어 그 눈금 단위는 벨(Alexander Graham Bell, 1847~1922)을 기념하여 B로

표기하고 벨이라 한다. 이 눈금 사이를 10등분하여 음의 세기를 데시벨(decibel, dB) 등급으로 표시한다. 데시벨 단위를 사용하여 음의 세기와 음압의 높이를 기준 세기 및 기준 음압에 대한 상대 준위로 나타낸다. 음의 세기 레벨 SIL은

$$SIL = 10 \log(I / I_{ref}) (dB) \quad (9)$$

$I = p^2 / \rho_0 c_0$ 이기 때문에 음압 레벨 SPL은 다음과 같다.

$$SPL = 20 \log(p / p_{ref}) (dB) \quad (10)$$

기준음의 세기는 사람이 들을 수 있는 최저 세기 10^{-12}W/m^2 을 택하고 이에 해당하는 공기 중 평균 음압 $20 \mu\text{Pa} (20 \times 10^{-6} \text{W/m}^2)$ 을 기준 음압으로 택하면 1W/m^2 의 소리세기 레벨은 120dB이다.



Figure 25. Acoustic analyzer for measuring characteristics of acoustic waves

1.1.4 온도 측정 장치

본 실험에서는 온도를 측정하기 위해 K타입의 열전대(Thermocouple)를 활용하여 스택 주변의 온도(Heating end, Cooling end) 및 실내 온도를 측정하였다.

이에 대한 수집 장치로서 널리 보편화되어 있는 Agilent사의 34970A 계측기를 사용하였다. 3슬롯 메인프레임으로 이루어져 있고, 내장형 GPIB와 RS-232 인터페이스, 전압, 온도를 측정할 수 있는 20개의 채널과 전류를 측정할 수 있는 2개의 와이어 채널이 내장되어 있으며 초당 최대 250채널 스캐닝이 가능하다.



Figure 26. Photograph of data logger(34970A)

1.1.5 전원 공급기(DC power supply)

전원 공급 장치는 열음향 레이저에서 스택의 한쪽 면을 가열 시켜주는 역할을 한다. 구리선을 통해 적절한 DC전원을 공급시켜 주면 니크롬선의 저항을 유발시켜 스택의 가열 면이 가열되게 되며 음향파를 발생시키는 열원이 된다.

전원 공급 장치로써 한국 이지 디지털(EZ digital)사의 GP-4303DU를 사용하였다. GP-4303DU는 최대 30V, 3A까지 전원 공급이 가능하며 출력안정도 5mV (전압원에 대하여)의 값을 갖는다.



Figure 27. Photograph of power supply

1.2 실험 방법

본 연구의 최종목적은 태양열을 이용한 열음향 레이저(TAL) 개발을 위한 기본 성능 분석 실험으로써, 열음향 레이저 공명튜브 및 스택의 기하학적 형상 및 Power 등을 변수하여 음압 및 주파수 등 음향파의 특성을 비교 분석하였다.

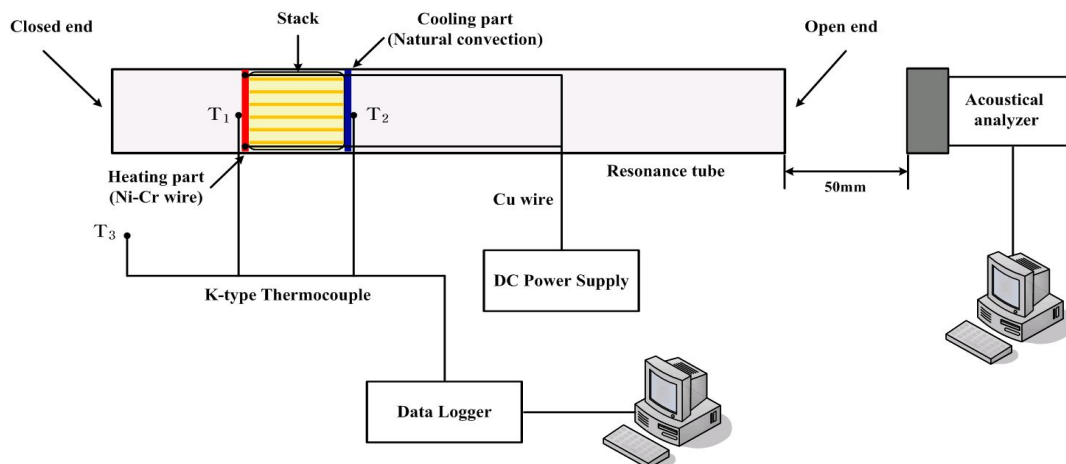


Figure 28. Schematic of thermoacoustic laser system

Figure 28은 본 실험의 장치 및 구성의 개략도이다. 전원공급기(DC Power supply)는 스택의 닫힌 면 쪽의 표면을 니크롬선을 통해 가열시켜주며 스택의 채널을 통해 음향파가 이동하게 된다. 이에 따라 공명 튜브의 정규 진동수와 일치하게 되면 소리가 발생하게 된다. 음압은 튜브의 열린 면 쪽에 5cm의 거리에서 음향분석기(Acoustical analyzer)로 1초 간격으로 측정하였고, 온도 역시 Data logger를 이용해 가열 면과 냉각 면의 온도 구배 와 실내온도를 1초 간격으로 측정하였다. 열음향 레이저에서 음향파가 발생하게 되면 온도가 증가하여도 전원공급 후 약 1분 정도만 지나도 일정한 음압을 유지하기 때문에 모든 실험은 3분 동안 진행 되었다.

본 논문에서는 공명튜브의 형상(길이 및 직경), 스택의 크기(길이 및 직경), 공명튜브의 직경, 스택의 위치, 공급 전압을 변수로 하여 음향파의 특성을 분석하였다. 아래에 실험의 조건을 표로 나타내었다.

Table 3. Experimental conditions

Resonance tube			Stack
Diameter(mm)	Length(mm)	Stack Position(cm)	Length(mm)
10, 15, 20	100	1, 2, 3, 4, 5	12.5, 25, 27.5, 50
	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	

2. 실험 결과 및 고찰

2.1 공명튜브의 형상과 스택의 위치에 따른 열음향 레이저 측정

본 실험에서는 공명튜브의 형상과 스택의 위치에 따른 음향파의 특성을 비교 분석하기 위하여 열음향 레이저 발생실험을 수행하였다. 스택의 길이와 공급전력은 25 mm, 25 W로 고정하였다. 공명튜브의 형상과 스택의 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 닫힌 면에서 1 ~ 15 cm로 변화시켰으며, 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.

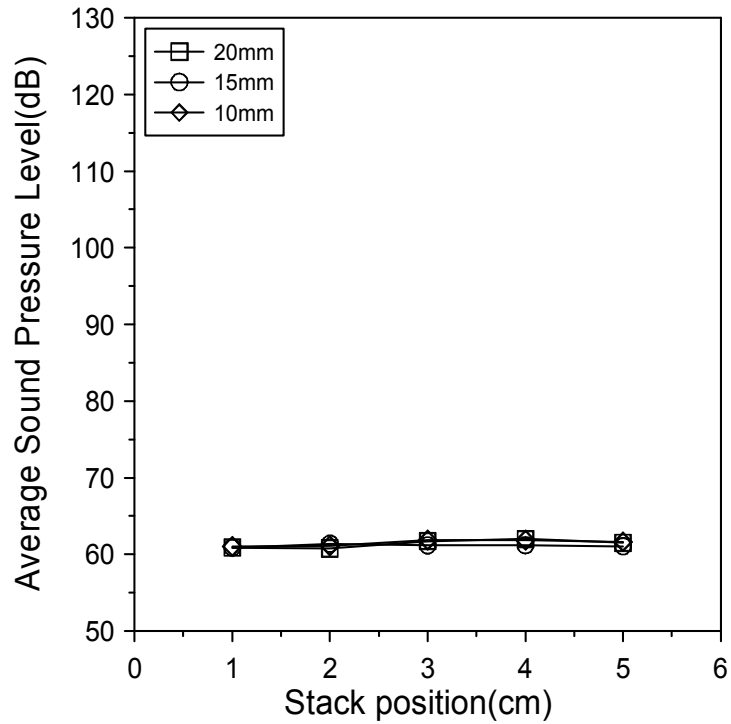


Figure 29. SPL with stack position (tube length : 100mm)

Figure 29는 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.

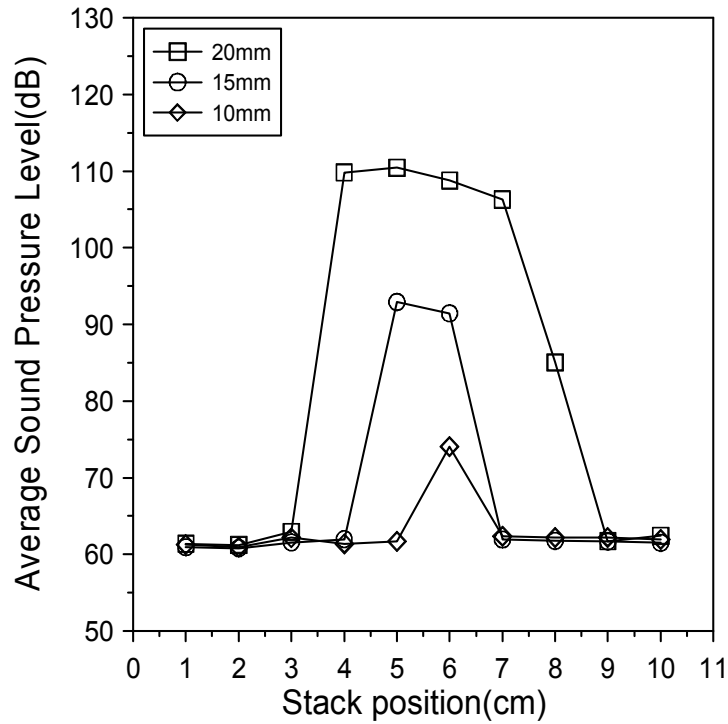


Figure 30. SPL with stack position (tube length : 150mm)

Figure 30은 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 줄어들다는 것을 의미한다.

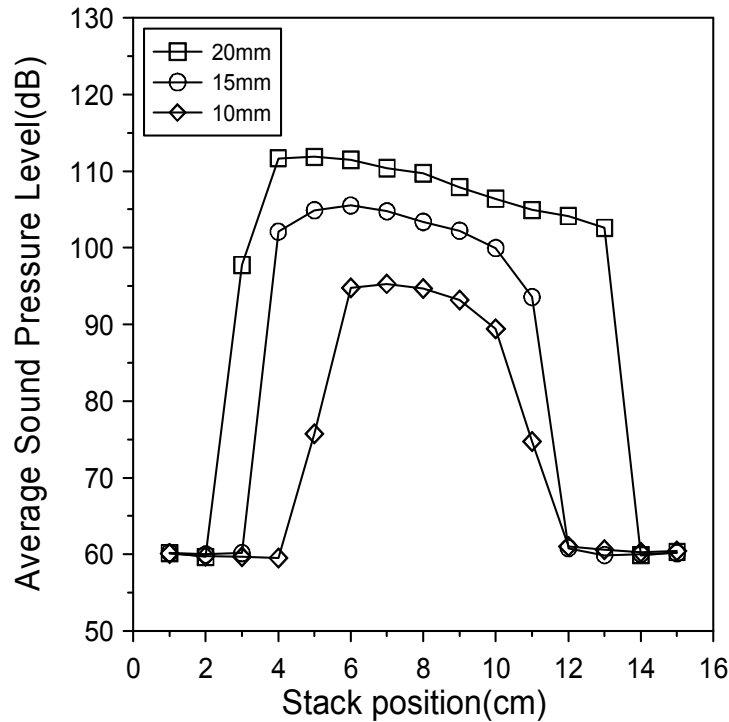


Figure 31. SPL with stack position (tube length : 200mm)

Figure 31은 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 닫힌 면에서 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.

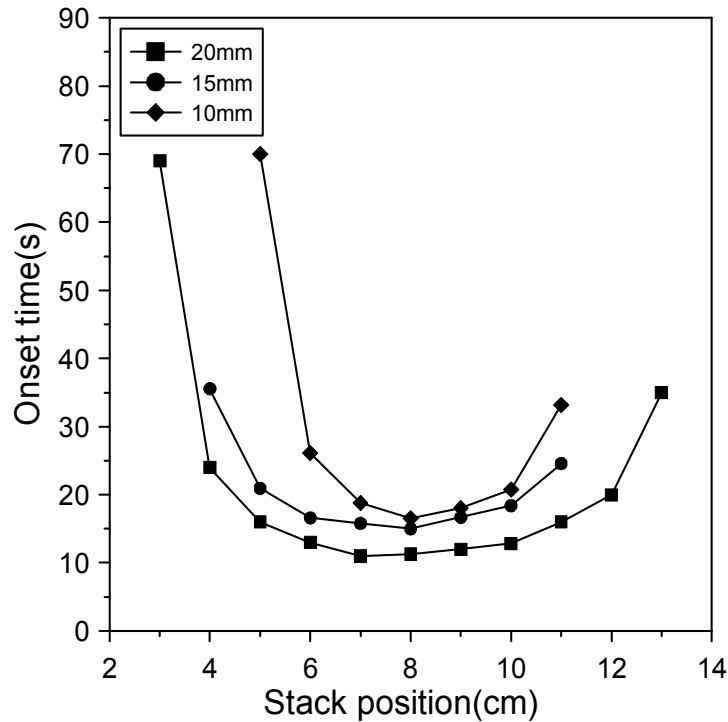


Figure 32. Onset time of acoustic waves with stack position
(tube length : 200mm)

Figure 32는 길이 200 mm의 공명튜브에서 스택의 위치에 따른 음향파 발생 시간을 비교하여 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. Swift가 보고한 내용과 일치한다.[G. W. Swift et al. 2002]

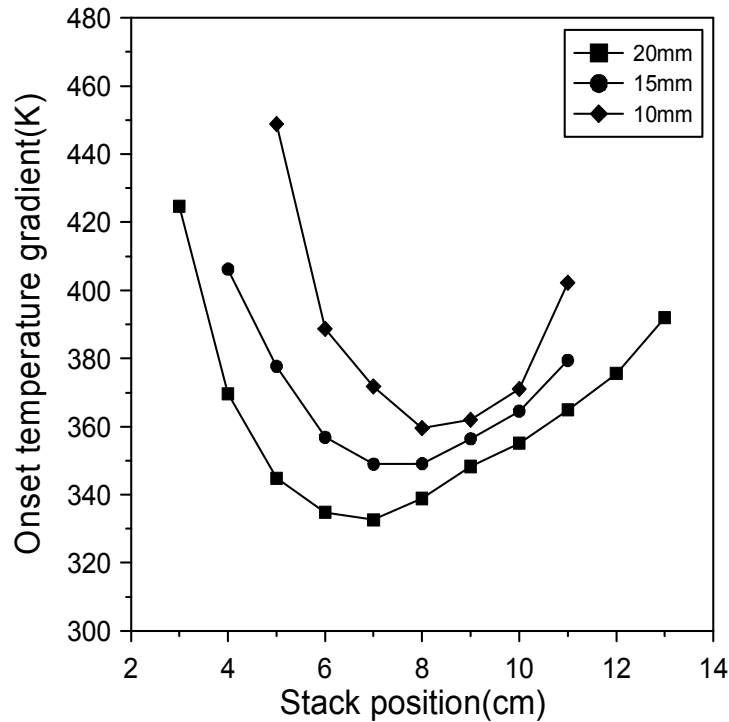


Figure 33. Gradient of generated acoustic waves with stack position
(tube length : 200mm)

Figure 33은 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 발생 온도구배의 경향은 Figure 32의 음향파 발생시간 그래프와 유사한 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, 튜브의 내경이 증가함에 따라 음향파 발생 온도구배는 감소함을 알 수 있었다. 또한 스택의 위치가 튜브의 닫힌 면과 열린 면에 가까워질수록 발생 온도구배가 증가한다는 사실을 알 수 있다. 발생 온도구배가 가장 낮은 스택의 위치는 내경 10, 15, 20 mm에서 8 cm, 6 cm, 7 cm이고, 이 때 음향파 발생 온도구배는 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.

2.2 공명튜브의 형상과 스택의 길이에 따른 열음향 레이저 측정

본 실험에서는 공명튜브의 내경과 스택의 길이에 따른 음향파의 특성을 비교 분석하였다. 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.

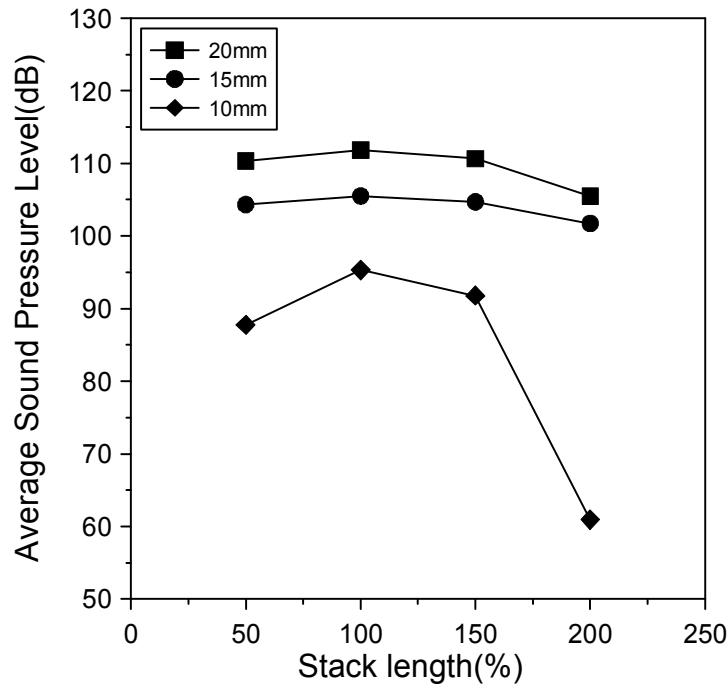


Figure 34. SPL with stack length (tube length : 200mm)

Figure 34는 공명튜브의 내경과 스택의 길이에 따른 음압을 비교하여 나타낸 그래프이다. 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.

3.3 공명튜브의 형상과 공급전력에 따른 열음향 레이저 측정

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

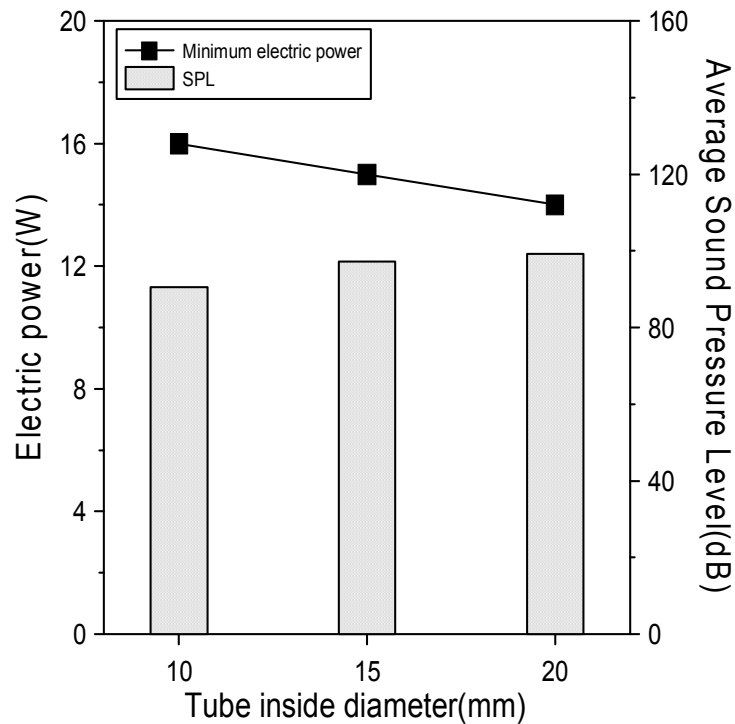


Figure 35. Min. power generating acoustic wave

Figure 35는 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력을 공명튜브의 내경에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공명튜브의 내경이 증가할수록 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 감소하며, 발생하는 음향파의 평균음압레벨은 증가한다는 것을 알 수 있다. 주파수는 동일하게 500 Hz로 측정되었으며, 음향파를 발생시킬 수 있는 최소공급전력은 내경 10, 15, 20 mm

에서 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 열에너지가 감소하며, 음향파의 음압레벨은 증가한다는 것을 의미한다.

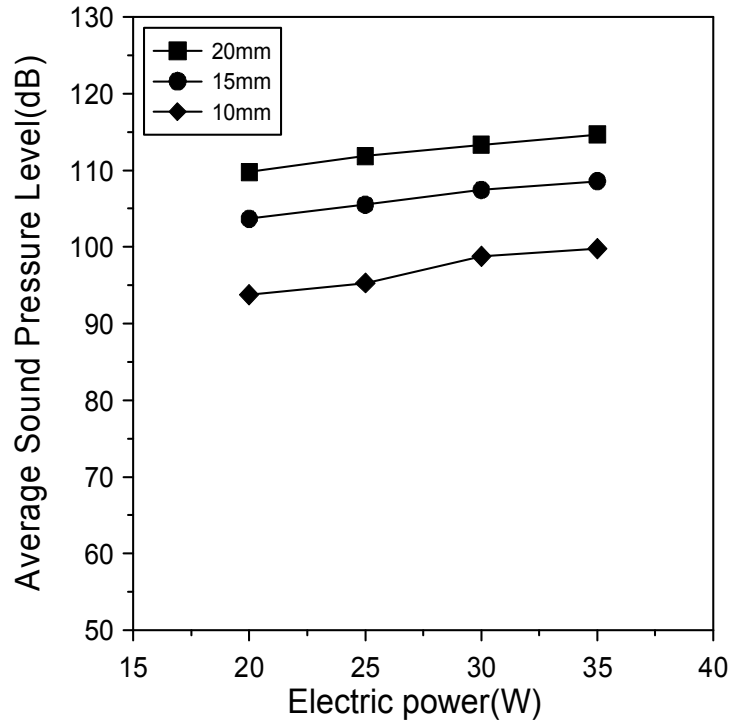


Figure 36 SPL with input power

Figure 36은 공급전력을 20 ~ 35 W로 증가시키면서 측정된 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.

V. 결 론

1. 나노유체의 특성

본 연구는 집열기의 작동유체로서의 가능성을 알아보기 위해 나노유체의 특성을 살펴보고자 하였다. 비정상 열선법을 이용하여 나노유체의 열전도도를 측정하고, 디지털 회전형 점도계를 통하여 나노유체의 점도를 측정하였다. 기본유체의 종류에 따른 열전도도 및 점도를 측정하여 열전도도 및 점도 특성을 살펴보고 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 나노유체의 열전도도를 측정하는 방법으로 잘 알려져 있는 비정상 열선법을 이용하여 열전도도를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였고, 문헌값(CRC Handbook of Chemistry and Physics)의 열전도도와 비교하였을 때 오차 범위 1% 이내로 일치하는 것을 보았을 때, 비교적 정확한 시스템을 구축하였다.

(2) 증류수를 기반으로 한 나노유체는 온도가 증가함에 따라 열전도도가 증가하였다. 나노유체(0.1 vol%)의 열전도도는 기본유체 대비 10℃에서 7.982%, 25℃에서 8.328%, 70℃에서는 9.142%가 증가하였다. 점도는 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 나노유체(0.1 vol%)의 점도는 기본유체 대비 10℃에서 37.08%, 25℃에서 33.96%, 70℃에서는 21.64%가 증가하였다.

(3) 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도 측정에서, 0.1 vol% 비율의 에탄올-산화탄소나노유체의 경우 열전도도는 순수 에탄올보다 10℃에서 33.74%, 25℃에서 33.14%, 70℃에서는 32.36%가 증가하였다. 0.1 vol% 비율의 나노유체 점도는 10℃에서 35.1%, 25℃에서 32.14%, 70℃에서는 19.02%가 증가하였다.

(4) 물, 에탄올 혼합 유체를 기반으로 한 나노유체의 열전도도는 0.1 vol%일 때, 10℃에서 33.74%, 25℃에서 33.14%, 70℃에서는 32.36%가 기본 유체 대비 증가 하였다. 0.1 vol% 비율의 나노유체 점도는 10℃에서 35.1%, 25℃에서 32.14%, 70℃에서는 19.02%가 증가하였다

2. 열음향레이저의 특성

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 단한 면에서 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, 공명튜브의 내경이 증가함에 따라 음향파 발생시간과 음향파 발생온도 구배는 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 발생하는 필요한 전력이 감소함을 알 수 있었다. 또한 공급전력이 20, 25, 30, 35 W일 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.

참 고 문 헌

International Energy Agency, Key World Energy STATISTICS, 2010

BP, Statistical Review of World Energy, 1986, 6

Afgam, N., New Developments in Heat Exchanger, Gordon and Breach Publishers, 1 - 696, 1996

Jung E. G., Boo J. H., Performance Characteristics of a Heat Pipe Having Water-Ethanol Mixture as Working fluid for Evacuated Solar Collectors, Journal of the Korean Solar Energy Society, 2006, Vol. 28, No. 5 ,pp. 78-84.

Ha H. J., Kong Y. C., Do K. H., Jang S. P., Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Heat Pipes Using Water-based MWCNT Nanofluids. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2011, Vol. 23, No. 7, pp. 528-534.

Do K. H., Jang S. P., Effect of nanofluids on the thermal performance of a flat micro heat pipe with a rectangular grooved wick, In., J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 3, pp 2183 - 2192, 2010

Lifei Chen, Huaqing Xie, Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2009, Vol. 352, pp. 136-140.

Min-Sheng Liu, Mark Ching-Cheng Lin, I-Te Hunang, Chi-Chuan Wang,

Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids, Heat and Mass Transfer, 2005 Vol. 32, pp. 1202–1210.

M. Rafati, A.A. Hamidi, M. Shariati Niaser, Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids), Applied Thermal Engineering, 2012, Vol. 45–46, pp. 9–14.

O. G. Symko, “Using sound to turn heat into electricity”, News Center, University of Utah. (2007)

Swift, G. W., “Thermoacoustic Engines”, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84 No. 4, pp. 1145–1180. (1988)

Rayleigh, L., “The Theory of Sound 2nd edition”, New York : Dover. (1945)

Feldman, K. T. and R. L. Carter, “A study of heat driven thermal pressure oscillations in a gas”, Journal of Heat Transfer, Vol. 92, No. 3, pp. 536–540. (1970)

Bass HE, raspet R, Belcher JR, Brewster J., “A study of element interaction in thermoacoustic engines”, Annual report of ONR Grant. (1995)

G. W. Swift, “Thermoacoustics”, Acoustical Society of America, (2002)

Donal Fahey, “Thermoacoustic Oscillations”, Wave Motion & Optics, pp. 1–9, (2006)

Ryne Lampe, 2008, “Design and Testing of Rapid Prototyped Stacks for thermoacoustic Applications”, Proceedings of The National Conference, April 12-14, pp. 1-8.

S. Ijima., 1991, Nature, 354, 56.

Y.H. lee, 2003, Application of Carbon NanoTube, Physics & High Technology, 12, 24-30.

R. Krupke, F. hennrich, H. V. Lo'hneysen, M. M. Kappesm, 2003, Science, 301, 18, 344.

Hone, M. Whitney, A. Zettl, 1999, Synthetic Metals, 103, 2498.

S. Berber, Y. K. Kwon, D. Tomanek, 2000, Physical Review Letters, 84, 4613.

Hugh D. Young, Roger A. Freedman, 2008, “University Physics”, Pearson.

윤석왕, 김호철, 김민곤, 서상준, 김영환, 2003, “물리음향학Ⅱ”, 아카넷.

Ha, J. U., Kim, M. H., Lee, J. W., Choe, S. J., Cheong, I. W., Shim, S. E., 2006, Journal of polymer science part A-polymer chemistry, 44, 6394-6401.

Nagasaka, Y., and Nagashima, A., 1981, Absolute Measurement of the Thermal Conductivity of Electrically Conducting Liquids by the Transient Hot-wire Method, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 14, 1435-1440.

Bently, J. P., 1984, Temperature Sensor Characteristics and Measurement System Design, Journal of Physics E: scientific Instruments, 17, 430-435.

Carslaw, H. S., and Jeager, J. C., 1959, conduction of Heat in Solids, Oxford University Press 2nd edition, 510.

Lide, David R, 2009, CRC Handbook of Chemistry and Physics 90/e,