

碩士學位論文

탄소나노튜브 분산 및 열전도
측정에 관한 연구



濟州大學校 大學院

에너지 工學科

徐 香 民

2010年 2月

탄소나노튜브 분산 및 열전도 측정에 대한 연구

指導教授 金南鎭

徐香民

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

徐香民의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 千院基 (印)

委員 李潤俊 (印)

委員 金南鎭 (印)

濟州大學校 大學院

2009年 12月

A Study on distribution and thermal conductivity
of carbon nanotubes

Hyang Min Seo
(Supervised by professor Nam Jin Kim)

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

2009. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Nam Jin 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	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	4
1. 탄소나노튜브	4
1.1 탄소나노튜브 개요	4
1.2 탄소나노튜브 구조	4
1.3 탄소나노튜브 성질	5
2. 탄소나노튜브 분산	9
2.1 기계적 분산	9
2.2 물리적 흡착에 의한 분산	10
2.2 화학적 개질에 의한 분산	12
3. 나노유체 연구 동향	12
III. 실험장치 및 방법	15
1. 탄소나노튜브 및 기본 유체	15
2. 탄소나노튜브의 분산	17

2.1 기계적 분산 방법(초음파 분산)	17
2.2 물리적 분산방법(계면 활성제, 고분자 화합물에 의한 분산) ..	19
2.3 화학적 분산방법(강산에서의 분산)	20
3. 열전도도 측정	21
3.1 비정상 열선법	21
3.2 휘트스톤 브리지	22
3.3 열전도도 측정장치	23
4. 열전도도 측정방법	27
5. 점도 측정	29
IV. 실험결과 및 고찰	31
1. 열전도도 측정	31
2. 점도 측정	35
V. 결 론	37
참 고 문 헌	39
감사의 글	

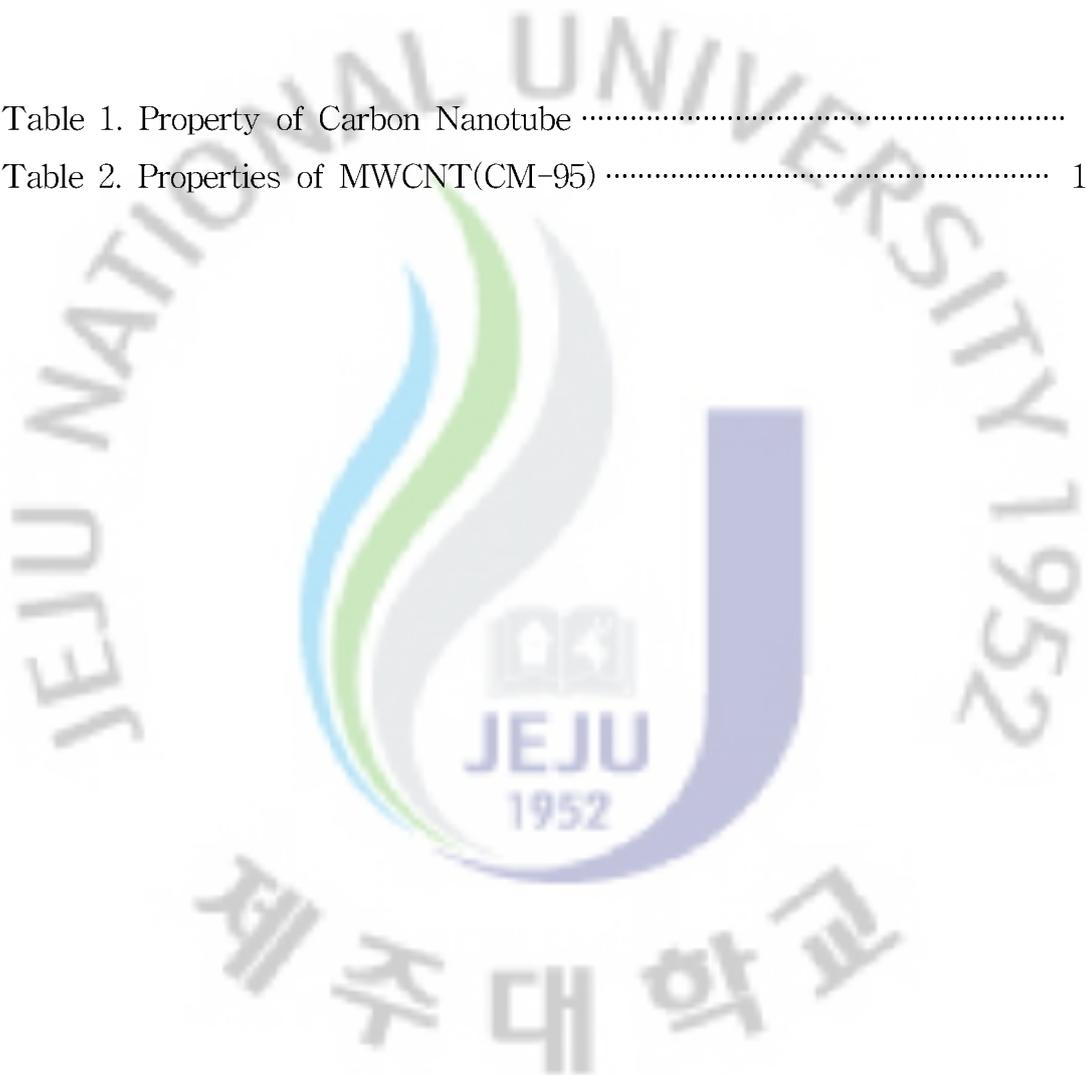
LIST OF FIGURES

Fig. 1. Structure of Carbone Nano Tube	5
Fig. 2. SEM microphoto of MWCNT;	
(a)Microphoto of MWCNT($\times 40,000$)	
(b)Microphoto of MWCNT($\times 200,000$)	16
Fig. 3. The photographs of the ultrasonic dispersing(VC-505)	18
Fig. 4. Schematic diagram of the the ultrasonic dispersion(VC-505) .	19
Fig. 5. The experimental apparatus of produce oxidation MWCNT	21
Fig. 6. Diagram of Wheatstone Bridge	22
Fig. 7. Diagram of experimental apparatus	23
Fig. 8. Photograph of wheatstone bridge experimental apparatus	24
Fig. 9. Photograph of Pt wire	24
Fig. 10. Photograph of Data logger(34970A)	25
Fig. 11. Photograph of power supply(E3648A)	25
Fig. 12. Photograph of bath circulator	26
Fig. 13. The measurement experimental apparatus of thermal conductivity	26
Fig. 14. Photograph of viscometer(DV II+pro)	30
Fig. 15. The measurement experimental apparatus of viscosity	30
Fig. 16. Validation of water to measure the thermal conductivity of the basefluid	31
Fig. 17. Various nanofluids sedimentation by elapsed time;	
(a) photograph of after sonicator dispersion	
(b) photograph of 2 hour elapsed time	32
Fig. 18. Thermal conductivity of MWNT as a PVP fraction	33
Fig. 19. Thermal conductivity of MWNT as a PVP fraction	34
Fig. 20. The thermal conductivity as a particle volume fraction	34

Fig. 21. Comparison of the viscosity as a dispersion 35
 Fig. 22. The viscosity as a dispersion particle volume fraction 36

LIST OF TABLES

Table 1. Property of Carbon Nanotube 6
 Table 2. Properties of MWCNT(CM-95) 15



SUMMARY

Currently, carbon nanotubes play a pivotal role in nanoscience and nanotechnology since their discovery in 1991. Their enforced mechanical, thermal, electrical, and optical properties have attracted material industry and academic society. owing to their great possibilities, carbon nanotubes are expected to substitute a variety of classical materials in future.

However, strong van der Waals force among carbon nanotubes and huge aspect ratio often resulted in self-agglomeration. These genuine properties have interrupted a fine dispersion of carbon nanotubes to matrix materials. To over come such obstacles, a number of research has dealt with surface modification of carbon nanotubes to improve their wettability and adhesion.

In this study, for the dispersion of multi-walled carbon nanotubes, two dispersion methods were used. One method is dispersing of carbon nanotubes with dispersants of polyvinyl pyrrolidone and Sodium Dodecyl Sulfate, SDS, and Polyvinylpyrrolidone, PVP, and the other one is dispersing of carbon nanotubes via a direct oxidization treatment with strong acid. SDS or PVP was added in pure water. And then, MWCNT of 0.0005, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.01, and 0.02 vol% was dispersed respectively. The thermal conductivity and the viscosity were measured with a transient hot-wire instrument built for this study and the DV II+ Pro viscometer.

The results showed that PVP had good thermal conductivity at 300 wt% and this was better than that of SDS 100 wt%. also, Oxidation MWCNT is showed best thermal conductivity than other nanofluids. The viscosity of nanofluids added SDS, PVP are higher increaing than nanofluid without

additive. also, Oxidaion nanofluid's viscosity was similar that nanofluid without additive. Therefore, many industrial sectors and the working fluids heat exchanger to be used nanofluids that chemical modification methods used to produce nanofluids.



I. 서 론

최근에 나노미터 크기의 극미세 영역에서 새로운 물리 현상과 향상된 물질 특성을 나타내는 연구결과가 보고되면서 나노과학 기술이라는 새로운 영역이 태동하게 되었고, 이러한 나노과학기술은 앞으로 21세기를 선도해 나갈 수 있는 과학기술로서 전자정보통신, 의약, 소재, 제조공정, 환경 및 에너지 등의 분야에서 필수적인 기술로 부각되었다.[Wang et al, 2007.] 나노(Nano)란 10억분의 1 m를 가리키는 단위로, 1나노미터(nm)는 머리카락 굵기의 10만 분의 1로, 대략 원자 서너 개 크기에 해당한다. 나노 기술이라 함은 Nanometer(nm) 수준에서 물질 혹은 소자(시스템)를 다루는 극 미세 기술을 총칭하는 것으로서, 물리, 화학, 생물, 재료 등 여러 학제간 과학 기술이 서로 융합해서 이루어지는 기술이다. 재료적인 관점에서 보면 수개 내지 수백개의 원자 혹은 분자 크기를 갖는 소재를 다루는 기술에 해당한다. 물질의 성질을 결정하는 최소단위는 분자(경우에 따라서는 원자 또는 단원자분자)이므로 나노소재 기술은 현재의 과학 상식으로는 마지막 소재 기술이라 할 수 있다. 나노테크놀로지가 공학에 적용될 수 있는 사례는 크게 세 가지로 살펴 볼 수 있다. 나노 물질을 제조하는 단계와, 나노 소자를 만드는 단계 그리고 나노 물성을 이용하여 기존의 공학에 응용하는 것이 그것이다. 그 중 마지막에 해당하는 것 중에 나노유체는 열 물성이 뛰어나 공학적 활용이 기대되는 물질이다.

특히, 이러한 나노기술 중에서 물이나 에틸렌글리콜 등의 기존 유체에 기능성 나노입자를 혼합하여 제조 후 구현되는 유체의 다양한 특성을 적용시키고자 하는 연구가 있으며, 미국의 에너지부 산하 Argonne National Lab.에서는 나노입자의 첨가에 따라 열전도도가 현격하게 향상됨을 Choi가 발표하면서 이를 처음으로 나노유체(Nanofluids)라고 명명하였다.[Choi et al, 1995.] 나노유체는 기존의 유체가 가지지 못하는 특성들을 갖는 기능성 유체로서 기존 유체에 나노입자를 혼합하여 제조된 유체를 말한다. 기존 유체가 가지는 열전도도는 고체 금속 입자 및 흑연 구조를 가지는 탄소입자에 비해 수백배에서 수천배가 낮다. 이러한 열전

도도 우수한 금속 나노입자를 기본유체에 안전하게 분산 시킨 나노유체는 열전도도 특성이 매우 우수하다는 사실이 보고되었고, 향후 다양한 산업분야에 응용될 것으로 예상된다.[A. Star et al, 2001.] 열교환기용 열매체내에 열전도도가 우수한 고체 입자를 분산시킴으로써 열전달 유체의 열전도도를 증가 시킬 수 있다는 이론은 이미 100년 전(Maxwell, 1881)부터 제시되고 있으며, 이를 시스템에 적용하기 위한 많은 연구가 수행되었다.[Choi et al, 2001.], [Asseal et al, 2004.] 주요 연구로 주입 입자를 수 mm 혹은 수 μm 크기의 금속입자를 첨가하는 방법을 사용하였으나, 이는 입자의 침전, 관내의 압력손실 증가, 막힘 현상, 경도가 높은 입자의 충돌에 의한 장치의 마모 및 파손 등 많은 문제점을 발생시켜 상용화에 실패하였다.

하지만, 나노 사이즈의 고체 입자를 유체 내에 분산시켰을 때 이런 문제점을 상당 부분 극복할 수 있음이 밝혀지고 있으며, 나노입자 제조기술의 발달에 따라 나노입자의 대량생산이 가능해지고 계면공학 등의 발달도 인해 분산성이 우수한 나노유체의 제조 가능성이 높아졌다. 특히 나노입자의 분산에 따라 기존의 밀리미터 혹은 마이크로미터 스케일의 입자 첨가에서 나타났던 열전도도 향상의 폭보다 월등히 큰 열전도도의 향상이 나타남을 보이면서 나노유체의 열전달 유체로의 적용 가능성을 크게 시사하고 있다.

그렇지만, 나노입자는 나노입자의 크기가 작아 분산시 안정성이 뛰어나기는 하나, 반데르발스 힘이 강하게 작용하여 응집된 입자가 분리되기 어렵기 때문에 단순히 기본 유체에 나노입자를 혼합하는 것만으로 나노유체의 특성을 기대하기 어렵다.[L. Henrard, 1999.] 따라서, 나노유체를 적절한 방법을 이용하여 균질한 혼합물로 만드는 것이 가장 중요하다. 입자의 혼합 농도에 증가에 따라 나노유체의 열전도율이 증가한다는 사실 이외에는 명백하게 확인된 결과들이 부족하며 나노유체의 기능성 유지를 위한 분산 안정성이 뛰어난 나노유체의 제조 및 정량적 평가에 대한 기초적인 데이터들이 부족한 것이 현실이다.

본 연구에서는 나노유체를 제조한 후, 비정상 열선법을 통해 열전도도를 측

정하여 고분자 화합물(Polyvinylpyrrolidone, PVP)의 적정 혼합비율을 알아보고, 계면활성제(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS), PVP를 첨가한 나노유체와 산처리된 나노유체의 열전도도를 비교하여 우수한 분산방법을 알아보고자 한다. 또한, 브룩필드사의 회전형 디지털 점도계를 이용하여 SDS, PVP를 첨가한 나노유체와 산처리된 나노유체의 점도를 측정하고 작동유체로서의 타당성을 알아보고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.



II. 이론적 배경

1. 탄소나노튜브

1.1 탄소나노튜브의 개요

1985년에 R.E. Smalley가 탄소의 동소체(allotrope)의 하나인 풀러렌(fullerene : 탄소 원자 60개가 모인 것, C₆₀)을 처음으로 발견한 이후,[R.E. Smalley et al, 1985.] 1991년 새로운 물질을 연구하던 일본전기회사(NEC) 부설연구소의 Iijima 박사가 전기방전법을 사용하여 흑연 음극상에 형성 시킨 탄소덩어리를 TEM으로 분석 하는 과정에서 가늘고 긴 대롱 모양의 탄소나노튜브를 발견하여 Nature 지에 처음으로 발표하였다.[S. Iijima, 1991.] 이때 성장된 탄소나노튜브의 길이는 수십 nm ~ 수 μm이었고, 외경은 2.5 ~ 30 nm이었다. 탄소나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 SP² 결합의 육각형 벌집형태를 이루며, 이 튜브의 직경이 대략 수nm 정도로 극히 작기 때문에 나노튜브라고 부르게 되었다. 탄소나노튜브는 여러 가지 응용가능 분야에서 많이 연구 개발 되어 지고 있다. 반도체와 평판 디스플레이, 배터리, 초강력 섬유, 생체 센서, 텔레비전 브라운관 등 탄소나노튜브를 이용한 장치가 수없이 개발되고 있고, 기능성 탄소나노튜브를 기본 유체 및 한정적인 특성을 지니는 유체에 분산시켜 새로운 특성을 가지는 물질을 개발하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다.[Y.H. Lee, 2003.]

1.2 탄소나노튜브 구조

탄소나노튜브는 탄소 원자로 구성된 육각형 모양의 SP² 구조의 벽을 가지고 오각형의 결합에 의해서 닫힌 구조를 가지는 튜브 모양의 탄소결합체로서 직경은 나노미터 단위이며 길이는 마이크로미터 단위로 매우 큰 면 비율을 가진다. 이러한 탄소나노튜브는 길이 방향을 축으로 감싸고 있는 벽의 수에 따라서 단일벽 탄소나노튜브(Single Wall Carbon NanoTube, SWCNT), 다중벽 탄소나노튜브

브(Multi-Walled Carbon NanoTube, MWCNT), 다발형 탄소나노튜브(Rope Carbon NanoTube)로 분류될 수 있다. 그리고 SWCNT의 경우, 말려진 벡터에 따라서 높은 대칭성을 갖는 두가지 구조인 암체어(Arm-chair), 지그재그(Zigzag)구조로 크게 나눌 수 있다.[R. Krupke et al. 2003.] Figure. 1은 탄소나노튜브의 구조 및 종류를 보여주고 있다. 암체어 구조이면 도체의 성질을 가지고 지그재그 구조이면 반도체의 성질을 갖는다. 다중벽 탄소나노튜브는 모두 도체의 성질을 지니고 있으며, 다발 형태인 탄소나노튜브는 반도체의 성질을 지닌다.

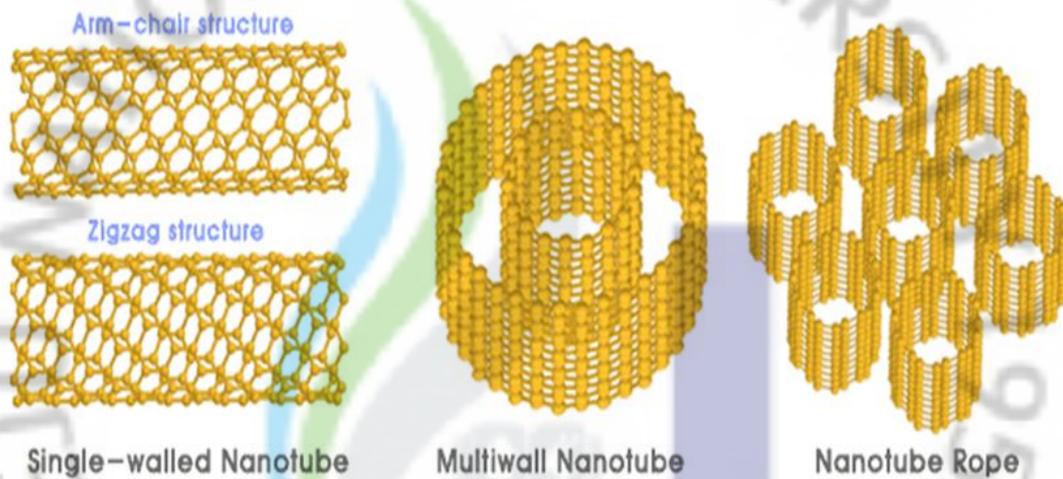


Figure. 1. Structure of Carbon Nano Tube.

1.3 탄소나노튜브 성질

탄소나노튜브는 나노크기의 흑연면이 실린더 구조로 동글게 말린 형태를 가지고 있으며, 크기나 형태에 따라 독특한 물리적 성질을 가지는 거대분자(Macromolecule)이다. 단일벽 탄소나노튜브는 단순히 흑연판 한 층을 말아 놓은 구조로 직경은 0.5 ~ 3nm이며 이중벽 탄소나노튜브는 단일벽 탄소나노튜브 두층이 동심 축을 이룬 형태로 직경이 1.4 ~ 3nm에 이른다. 다중벽 탄소나노튜브는 벽수가 3 ~ 15겹의 층을 이루며 직경은 5 ~ 100nm에 이른다. 탄소나노튜브의 독특한 전기적 특성은 1차원적 구조와 흑연 고유의 전기적 구조에 기인하며 매

우 낮은 전기적 저항 값을 나타낸다. 단일벽 탄소나노튜브의 경우 저항 값은 1/100에 불과하며 전류수송능력은 구리의 1,000배에 이른다. 기계적 물성 측면에서 탄소나노튜브는 구조적으로 탄소-탄소간의 강한 결합을 이루고 있음에 따라 매우 높은 강성과 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 ~ 2Gpa 인 것과 비교하여 매우 높은 기계적 물성을 나타내는 것이다. 또한 탄소나노튜브의 열전도도는 지금까지 알려진 최고의 열전도체인 다이아몬드 보다 두 배나 큰 열전도도를 나타낸다. Table. 1에 SWCNT와 MWCNT의 성질에 대해 비교 정리해 보았다.

이들 구조에 따른 물리적 특성 평가에 대한 연구가 최근 많이 진행되고 있으나, 아직까지 해결되어야 할 과제가 많이 남아 있는 실정이다. 그 이유는 탄소나노튜브가 직경, 길이, chirality에 따라 다양한 물리적 성질을 가지고 있기 때문이다. 전기적, 열적, 기계적 성질들을 아래에 서술해 보았다.

Table 1. Property of Carbon Nanotube

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 전기적 성질

1998년 Frank는 SPM(Scanning Probing Microscopy)을 이용하여 탄소나노섬유를 수은 액체상에 담지하여 전도성을 측정하였다.[Frank et al, 1998.] 그 결과 탄소나노튜브가 양자거동을 보이면서 획기적인 전도성을 가진다고 MWCNT의 전도성은 각 나노튜브가 수은 액체상에 첨가될 때마다 $1G_0$ 만큼 증가하였다. 이때 G_0 의 값은 $1/12.9k\Omega^{-1}$ 이다. 1999년 Sanvito등은 scattering 기법을 이용하여 MWCNT의 전도성을 측정하였으며 Frank의 결과를 재확인 하였다.[S. Sanvito et al, 2000.] 또한 이들은 MWCNT내의 양자 전도성 채널이 interwall 반응에 의해 감소됨을 관찰하였고, 이 반응에 의해 각 탄소나노튜브의 전자흐름이 재배치됨을 관찰하였다. Thess등은 rope 형태의 금속성 SWCNT의 저항을 four-point 기법을 이용하여, 300K에서 약 $10^{-4}\Omega/cm$ 임을 관찰 하였으며, 이 값은 현재 알려진 고 전도성 탄소나노섬유보다 더 높은 값을 가진 것으로 나타났다.[A. Thess et al, 1996.] Frank등과 Avouris등은 각각 $10^7A/cm^2$ 이상, $10^{13}A/cm^2$ 이상의 안정된 전류 밀도가 나타남을 관찰하였다.

1.3.2 열적 성질

탄소나노튜브의 열전도도는 온도와 Phonon의 평균자유경로에 의존한다. Hone 등은 1999년 탄소나노튜브의 열전도도가 온도에 일차적인 관계식을 가짐을 발표 하였으며, 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 열전

도도의 온도에 대한 상관관계가 선형적이기 보다는 다른 특성을 갖는다고 주장하였는데, 즉 100K의 온도까지는 $37,000\text{W/m}\cdot\text{K}$ 인 최대치까지 증가하다가 400K부터는 $3,000\text{W/m}\cdot\text{K}$ 로 급격히 감소한다고 보고 하였다.[S. Berber et al, 2000.]

1.3.3 기계적 성질

SWCNT의 탄성은 최근 탄소나노튜브 분야에서 활발하게 연구가 진행되고 있는 구조이다. 전반적으로 SWCNT는 강철보다 10 ~ 100배 견고하고 물리적인 충격에 강하다. 탄소나노튜브의 tip에 힘을 가하면 손상없이 구부러지며, 힘을 제거하면 원래상태로 되돌아간다. 그러나 이런 현상을 정량화하는 것은 아주 어려운 문제로 알려져 있다. 1996년 미국 Princeton 대학과 Illinois 대학의 연구팀은 평균 Young's modulus가 1.8Tpa임을 측정하였는데, 이들은 튜브를 자유롭게 세운 후, tip의 미세사진을 촬영하여 다양한 온도에서 blur의 양으로부터 계수를 계산하였다.[M. M. J. Treacy et al, 1996.] 1997년 Goddard는 압축어 나노튜브의 계수가 640.30Gpa이고, 지그재그나노튜브가 648.43Gpa임을 제시 하였는데 위에서 측정된 1.8Tpa값과는 상당한 차이를 보여주었다.[W. A. Goddard, 1998.] 1998년 Treacy등은 탄성계수가 1.25Tpa임을 보고하였다.[M. M. J. Treacy et al, 1998.] 이 값은 1997년 Wong등에 의해 관찰된 MWCNT의 1.28Tpa와 비교될 수 있다. 이들은 AFM을 이용하여 지지체에 고착되지 않는 나노튜브의 한 끝을 평형상태에서 벗어나게 하고, 이때 Tip에 작용하는 힘을 기록함으로써 계수를 측정하였다.[E. W. Wong et al, 1997.] 1999년 Rubio등은 SWCNT의 Young's modulus가 직경 및 chirality에 크게 의존함을 보고 하였다.[A. Rubio et al, 1999.] 위의 결과들을 보면 SWCNT의 경우 탄성계수가 직경 및 구조에 크게 의존함을 알 수 있다. 그러나 1999년 Forro등은 AFM을 이용하여 MWCNT의 경우에 계수가 지름에 크게 의존하지 않고, 나노튜브내의 결함 등의 구조적인 면에 크게 의존한다고 보고 하였다.[L. Forro et al, 1999.] 또한 이들은 15 ~ 20nm의 직경을 가지는 SWCNT의 bundle에 대해 100Gpa의 계수를 보고 하였다. 계수에 대한 값들에 대한 논쟁은 계속되고 있으며, 이것은 나노튜브의 벽 두께에 대한 연구자들이 자의적인 해석에 의해 크게 기인하는 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 탄소분자

가 완전히 고체상의 실린더 형태를 가진다면 계수는 앞서 논의된 값보다 작은 값을 보일 것이며, 튜브형태이면서 벽 두께가 작을수록 계수는 증가할 것으로 예상된다.

2. 탄소나노튜브의 분산

탄소나노튜브는 흑연판 사이의 상호작용과 유사하게 튜브와 튜브간의 강한 반데르발스 상호 작용으로 인하여 다발이나 응집체 형태로 존재한다. 이러한 응집 현상은 전기적 물성이나 기계적 물성을 향상시키는 목적의 나노유체를 제조함에 있어서 방해로 한다. 작동 유체 내에서 탄소나노튜브가 가능한 개개의 탄소나노튜브로 분산되지 않으면 탄소나노튜브의 장점을 발휘 할 수 없다. 따라서 탄소나노튜브의 분산시키는 기술은 나노 유체 제조에 있어서 가장 중요하다. 탄소나노튜브를 분산하기 위해서는 기계적 분산 방법(초음파 분산, 볼밀링에 의한 분산, 연마와 마찰에 의한 분산, 높은 전단력에 의한 분산)과 물리적 흡착에 의한 분산 방법(계면 활성제에 의한 분산, 고분자에 의한 분산), 화학적 개질에 의한 분산(강산에서의 분산)등이 있다.

2.1 기계적 분산

2.1.1 초음파 처리

알콜류와 같은 용매에 탄소나노튜브를 넣고 초음파 처리(Ultrasonication)하여 분산시키는 것이 가장 단순한 일반적인 방법이다. 하지만 초음파 처리시 나노튜브에 손상이 크게 발생하며, 좀 더 비파괴적인 방법으로 분산시키기 위해 다이아몬드 결정을 이용한 초음파 처리 분산연구가 수행되어 졌으며 결과적으로 SWCNT에는 손상을 주지 않으면서 다발만 파괴된다는 보고가 있다.

다층벽 탄소나노튜브 (MWCNT)의 초음파 처리시 외부벽부터 파괴가 시작되어 내부벽 방향으로 진행하며, 길이의 절단과 동시에 두께의 감소가 동시에 진행

되는 것으로 알려지고 있다. 아크방전법 등으로 만든 SWCNT 소재에는 흑연, 비정질탄소, 촉매금속 등 많은 불순물들이 포함되어 있으며, 초음파 이용시 탄소 나노튜브와 강하게 흡착된 위와 같은 불순물 제거에 아주 효과적이다. MWCNT의 경우 초음파 처리시 산화온도가 약 50 ~ 100°C 감소한다.

2.1.2. 볼밀링에 의한 분산

볼밀링(Ball Milling)은 탄소나노튜브의 길이와 직경분포를 최소화하기 위해 사용될 수 있다. 이 과정에서 나노튜브의 tip 이 열려서 기체흡착 능력을 증대시킬 수 있다. 그러나 상당량의 비정질 탄소가 발생하여 탄소나노튜브에 많은 손상을 주게 된다. 볼밀링은 리튬-SWCNT 층간화합물을 제조하기 위한 공정으로 사용될 수 있으며, 볼밀링 처리된 SWCNT를 이차전지 전극으로 사용할 수 있다. 이와 비슷하게 SWCNT와 MWCNT에 K, Rb, Cs과 같은 알칼리 금속을 도핑하기 위한 공정에서 볼밀링 처리 연구가 수행되고 있다.

2.1.3. 연마와 마찰

연마공정은 다른 방법에 비해 좀 더 파괴적인 방법이며, SWCNT의 절단과 구부러짐을 발생시킬 수 있다. 이 공정에 비해 손상을 덜 줄 수 있는 방법으로, cyclodextrin 용매를 나노튜브와 함께 막자사발에 넣고 연마공정을 통해 화학적으로 절단하는 방법이 있다.

2.2 물리적 흡착에 의한 분산

2.2.1 용매와 분산제를 이용한 분산

분자단위의 단위소자 등 다양한 응용분야에서 탄소나노튜브를 적용하기 위해서는 용액 상에서 다루는 것이 매우 유용하다. 현재까지 SWCNT를 분산시키는 최적의 용매는 amide 계열이며 특히, N,N-dimethylformamide (DMF), N-

methylpyrrolidone(NMP) 등이 있다. 그러나 이러한 용매에 의한 분산은 시간이 지날수록 불안정한 특성을 가지고 있다. K.D. Ausman 등은 다양한 용매를 이용하여 상온에서 SWCNT의 용해도를 관찰하였으며, 비 수소결합을 가지면서 루이스 염기특성을 가진 용매가 가장 우수한 용해도를 보인다고 보고하고 있다.

용매를 사용하여 분산하는 방법의 장점은 SWCNT 고유의 성질을 유지할 뿐만 아니라 길이 역시 유지된다는 점이다.

계면활성제를 이용하여 탄소나노튜브가 용액상에서 용해될 수 있다. 계면활성제의 역할은 탄소나노튜브 표면에 효과적으로 코팅되어 정전기적 반발력이나 steric 반발력을 유도하여 분자간의 힘인 van der Waals 인력을 극복하는 것이다. 그러나, 계면활성제 사용은 탄소나노튜브의 고유특성을 유지시킬 수 있는 장점을 제공하나, 주후 공정에서 계면활성제의 제거가 큰 문제가 될 수 있으며 최대 분산농도도 약 1% 수준에 불과하다.

2.2.2 고분자를 이용한 분산

탄소나노튜브 입자의 nm ~ μm 수준에서의 응집현상 때문에 이 응집체를 물리적 힘에만 의존하여 분산하는 것은 대단히 어렵다. 일반적으로 나노튜브 복합체는 나노튜브와 고분자를 직접 혼합하거나, 모노머 단계에서 in-situ polymerization 방법에 의해 제조할 수 있다. 고분자 자체에 나노튜브를 직접 혼합하는 방법보다 전구체인 모노머 수준에서 나노튜브를 혼합하여 복합체를 제조하는 방법이 탄소나노튜브의 효율적인 분산차원에서는 나은 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.

2.3 화학적 개질에 의한 분산

2.3.1 강산에서의 분산

다양한 합성방법으로 얻어진 탄소나노튜브는 일단 초음파를 이용하여 분산시키는 것이 가능하지만, 나노튜브 분산용액의 농도가 증가할수록 콜로이드 안정성이 감소하면서 서로 뭉치게 된다. 또한, 초음파 처리 자체가 나노튜브에 큰 손상을 주게 된다. 탄소나노튜브의 표면의 기능화는 나노튜브와 액체 미디어간의 상호작용에 영향을 준다. 탄소나노튜브를 산용액에서 오랫동안 끓이거나 담가두면 촉매금속이 용해되면서 제거되고, 공기나 산소분위기에서 350 ~ 400°C의 열처리 온도에서 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 나노튜브의 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 침전현상이 발생하지 않고 안정된 탄소나노튜브 분산 용액을 얻을 수 있다. 산처리 과정에서 open tip 이 형성될 수도 있으며, 이와 같은 처리를 통해 나노튜브는 수용액이나 알코올류의 용액에서 정전기적으로 안정한 용액을 형성할 수 있다.

3. 나노유체 연구 동향

1999년 Lee등에 의해 발표된 나노유체 열전도도 측정결과는 비정상 열선법을 이용하여 18.6, 23.6 nm의 Copper Oxide(CuO)와 24.4, 38.4 nm의 Aluminum Oxide (Al_2O_3)를 물과 에틸렌 글리콜에 분산한 나노유체를 만들어 총 4 가지 경우를 두고 열전도도를 측정하였다.[Lee et al, 1999.] 이 연구결과에서는 입자의 체적분율에 따라 열전도도의 증가폭이 커지며, 입자의 열전도도가 높은 CuO의 열전도도가 더 높게 나타남을 보였으며, 처음으로 고전적인 액체-입자 혼합물의

열전도도 모델인 Hamilton -Crosser 모델과 비교하였을 때 나노유체의 열전도도가 계산값보다 높게 나타남을 보였다. 이들은 나노유체의 열전도도는 나노유체의 입자의 종류와 크기, 유체의 종류에 따라 크게 달라진다고 결론 내렸다. 1999년 Wang 등은 물과 에틸렌글리콜 그리고 진공펌프 오일과 엔진 오일에 각각 Al₂O₃ 과 CuO를 분산시켜 평행판 방법(The steady-state parallel plate method)을 이용하여 나노유체의 열전도도를 측정하였다.[Wang et al, 1999.] 모든 실험 결과에서 나노 유체의 열전도도는 향상 되었으며 나노 입자의 체적비가 증가함에 따라 열전도도도 증가한다고 보고 하였다. 2000년 Xuan 등은 물과 변형 오일에 구리 (Cu)입자를 분산시켜 나노유체의 열전도도를 측정하였다.[Xuan et al, 2000.] 모든 실험 결과에서 나노 유체의 열전도도는 향상 되었으며 나노 입자의 체적비가 2.5%에서 7.5%로 증가함에 따라 열전도도가 1.24에서 1.78배까지 증가한다고 보고 하였다. 2000년 Riggs 등은 측면 질산이나 황산 등의 혼합산을 이용하여, 탄소 나노튜브의 표면을 화학적으로 산화시킴으로써, -C=O, -COOH 등의 산소를 함유하는 기능기를 도입하여 수용액상에서도 안정한 탄소나노튜브를 얻었다고 보고 하였다.[Riggs et al, 2000.] 2001년 Choi 등은 CNT(Carbon Nanotube) 나노입자를 Poly α-olefin Oil에 혼합하여 대기압에서 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 탄소나노튜브의 체적비가 1 vol%에서 열전도율이 160%정도 향상되었다고 결과를 보고 하였다.[Choi et al, 2001.] 2001년 Eastman 등은 모재로부터 증발된 금속입자를 냉각된 대상 유체에 연속적으로 접촉시키는 새로운 나노유체 제조방법 (one-step method)으로 에틸렌 글리콜-Cu 나노유체를 제조하여 열전도도를 측정하였다. 구리 입자의 체적비가 0.3%일 경우에 열전도도가 약 40%정도 증가한다고 보고 하였다.[Eastman et al. 2001] 2001년 O'connell 등은 물 또는 다른 극성 용매에 잘 녹으며, 녹은 상태에서는 좋은 젖음성을 보여 손쉽게 필름화 하는 고분자 화합물 PVP (Polyvinylpyrrolidone)의 성질을 이용하여 탄소나노튜브를 분산 시켰다. PVP를 사용하여 탄소나노튜브를 분산 할 때 분산 안정성이 좋아진다고 발표 하였지만, 그 정확한 수치는 제시하지 못하였다.[O'connell et al, 2001.] 2002년 Xie H. 등은 SiC 입자를 에틸렌글리콜에 분산시켜 SiC 나노 입자의 형상에 따른 나노유체 제조 후 열전도도 증가율을 측정하여 열전도율의 증가가 입자의 크기뿐만 아니라 형상에 의한 영향이 존재함을 알 수 있으나 아직 형상

에 의한 열전도도 차이에 대한 정확한 메커니즘은 규명하지 못하였다.[Xie et al, 2002.] 2003년 Das등은 Al_2O_3 와 CuO 나노유체에 대해 온도의 증가에 따른 열전도도를 측정하여 온도가 증가함에 따라 열전도도의 증가폭이 더욱 커지는 것을 보였으며, 나노입자의 유체 내 브라운 운동에 의한 열전도도 향상 모델을 제시하여 나노유체의 온도에 따른 열전도도 향상 정도의 증가를 설명하였다. 또한 5nm 이하의 Au, Ag 나노입자를 분산시켜 체적분율 0.01%이하에서 최대 9%까지 열전도도가 향상될 수 있음을 보여 나노유체 내 입자의 분산 안정성과 입자의 크기가 열전도도의 향상에 큰 영향을 미침을 보여 주었다.[Das et al, 2003.] 2002년 Jiang등은 물을 기본유체로 하고 분산제인 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate: $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$)의 첨가량에 따른 MWCNT 입자의 분산 안정성을 Zeta Potential과 분광광도계(UV-vis Spectrophotometer)를 이용하여 시간에 따른 입자의 침전량을 정량적으로 평가하였다.[Jiang et al, 2003.] 2003년 Xie등은 탄소 나노튜브를 물과 에틸렌글리콜과 Decene에 혼합하여 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 측정 결과 적은 양의 체적비에서도 나노유체의 열전도도는 크게 향상되었으며 열전도도는 탄소나노튜브의 체적비가 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다고 보고 하였다. 탄소나노튜브의 입자의 크기와 형상은 이러한 비선형적인 증가의 원인이 된다고 제시하였다.[Xie et al, 2003.]

III. 실험 장치 및 실험 방법

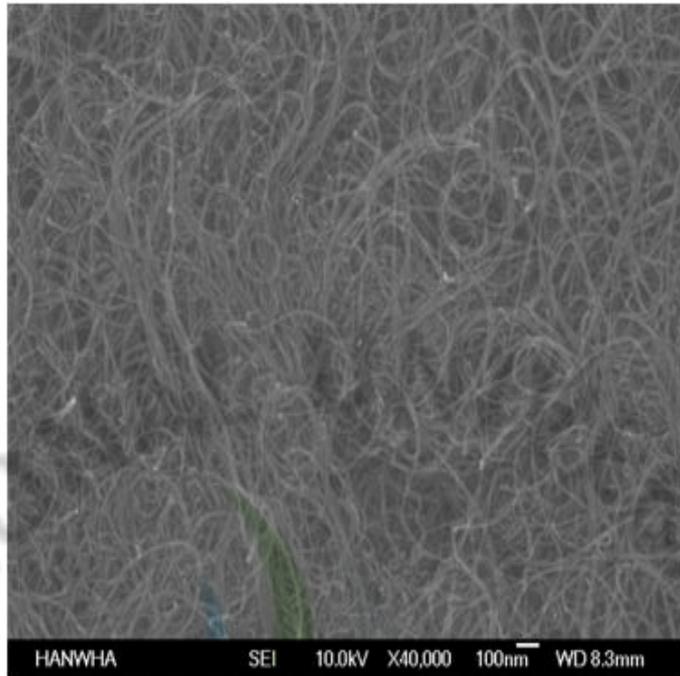
1. 탄소나노튜브 및 기본 유체

본 연구에서 사용된 탄소나노튜브는 화학증기증착법(Chemical vapor deposition)으로 제조된 것으로서 길이 10 ~ 15nm크기의 순도 95%의 다중벽 구조로 된 탄소나노튜브(Multi walled carbon nanotubes, CM-95)이며 한국의 한화나노텍에서 구입하여 사용하였다. CM-95의 물성치는 Table 2에 나타내었다. 나노유체를 제조하기 위해서 사용된 기본유체는 자동 증류수기(ADA-04)를 이용하여 1번 증류한 증류수를 사용하였다. 물의 열전도도는 300K에서 0.613W/m·K이다. Figure. 2는 본 실험에서 사용된 탄소나노튜브를 전자현미경(SEM)을 이용하여 40,000배, 200,000배 확대하여 촬영한 사진이다. Figure. 2에서 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 순수 물에 균일하게 분산할 수 있어야 나노 유체의 열전달 성능을 효과적으로 분석할 수 있을 것이다.

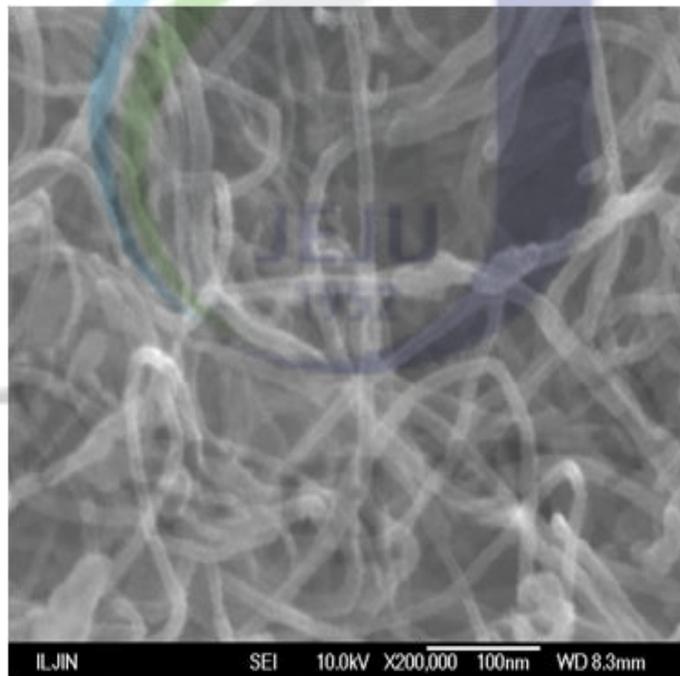
Table 2. Properties of MWCNT(CM-95)

[출처: Hanwhananotech; <http://www.hanwhananotech.co.kr>].

Properties	MWCNT(Value)	Test Method
Diameter(nm)	10 ~ 15	HR-TEM
Length(μ m)	10 ~ 20	SEM
Purity (wt.%)	95	TGA, SEM, HR-TEM
Bulk Density(g/cm^3)	0.1	Tapping Method
True Density(g/cm^3)	1.8	
Surface Area(m^2/g)	200	BET
Thermal conductivity(W/m·K)	Max. 3000	



(a) Microphoto of MWCNT($\times 40,000$)



(b) Microphoto of MWCNT($\times 200,000$)

Figure. 2. SEM microphoto of MWCNT.

2. 탄소나노튜브의 분산

탄소나노튜브는 흑연판 사이의 상호작용과 유사하게 튜브와 튜브간의 강한 반데르발스 상호 작용으로 인하여 다발이나 응집체 형태로 존재한다. 이러한 응집 현상은 전기적 물성이나 기계적 물성을 향상시키는 목적의 나노유체를 제조함에 있어서 탄소나노튜브의 3차원적인 네트워크 구조형성을 방해한다. 작동 유체내에서 탄소나노튜브가 가능한 개개의 탄소나노튜브로 분산되지 않으면 탄소나노튜브의 장점을 발휘 할 수 없다. 따라서 튜브간의 간격을 벌리고 효과적으로 작동 유체 내에 분산시키는 기술은 나노 유체 제조에 있어서 가장 중요한 단계라 할 수 있다. 탄소나노튜브의 분산 방법은 크게 물리적인 결합을 이용하여 탄소나노튜브를 대상 물질로 감싸서 분산 시키는 방법과 탄소나노튜브의 표면에 공유 결합을 통해 화학적으로 처리를 한 기능기를 부착 시켜 용매에 대한 친화력을 높여주어 분산성을 증대 시키는 방법으로 나눌 수 있다. 화학적 방법을 사용할 경우에 원하는 용액 내에 친화력이 좋은 기능기를 부착함으로써 다양한 용매에 대한 분산을 기대할 수 있으나 산화 처리법 등을 이용하게 되면 그 과정이 물리적 방법보다 까다롭고 화학적 처리 후 환경적인 오염이 생길 수 있다. 이에 비하여 물리적인 분산 방법은 용매의 선택성은 줄어들지만 화학적 방법에서 생길 수 있는 탄소나노튜브의 결합을 최소화 할 수 있고 그 과정이 간단하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 계면활성제(SDS), 고분자 화합물(PVP)를 탄소나노튜브와 혼합하여 분산하는 물리적인 방법과 탄소나노튜브에 직접 화학적인 처리를 하는 방법(Oxidation dispersion)을 이용하였고, 50ml의 증류수에 탄소나노튜브를 0.0005 vol% ~ 0.02 vol%까지 혼합하여 2시간 동안 초음파 분산하여 나노유체를 제조하였다.

2.1 기계적 분산 방법(초음파 분산)

초음파 분산기는 초음파 분산 전문 업체인 Young Jin Co. 사의 500watt급의 초음파 분산기인 VC-505이다. 20kHz를 초음파를 발생하고, 직경 13mm stainless

Probe를 장착하여 사용하였다. 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 stainless probe 를 이용하여 증폭시키면 강한 세기 20KHz 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 파쇄될 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. Figure. 3과 Figure. 4는 초음파 분산기의 전체적인 모습을 나타낸 사진과 개략도이다.



Figure. 3. The photographs of the ultrasonic dispersing(VC-505).



Figure. 4. Schematic diagram of the the ultrasonic dispersion(VC-505).

초음파 분산기의 구성은 크게 세가지로 나눌 수 있다. 초당 정해진 횟수의 전기 스파크를 발생시키는 Power Supply, 전기 스파크에 의해 진동이 일어나는 압전성 특징을 가진 물질이 있는 Converter, Converter에서 발생한 진동을 증폭시켜주는 Probe로 나눌수 있다. VC-505는 Probe에 전달되는 에너지(Joules)의 실제적인 양을 디지털로 표시하여 주고, 1초에서 10시간에 이르기까지의 작동 시간 조절이 가능하다.

2.2 물리적 분산 방법

2.2.1 계면 활성제(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)에 의한 분산

탄소나노튜브의 분산을 위해 사용된 분산안정제는 Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)로 선택 하였다. SDS는 음이온성 계면 활성제의 일종으로서, 탄소나노튜브 표면에 효과적으로 코팅되어 정전기적 반발력이나 Steric 반발력을 유도하여 분자간의 힘인 반데르발스 인력을 극복하게 한다. 특히, 비극성 용매에 극성 물질을 섞을 때 유용하기 때문에 비극성 입자인 카본나노튜브가 극성용매인 물에 잘 섞이기 위해 대표적으로 사용되기 때문에 선택하였다. SDS의 혼합 비율은 기존

연구에서 우수하다고 잘 알려져 있는 탄소나노튜브 체적 대비 100 wt%를 첨가하여 나노유체를 제조 하였다.[Assael et al, 2004.]

2.2.2 고분자 화합물 (Polyvinylpyrrolidone, PVP)에 의한 분산

탄소 나노 튜브의 분산을 위해 사용된 고분자는 입체 안정제중 하나인 PVP (Polyvinylpyrrolidone,)로 분자량이 360,000인 K=90을 사용하였다. PVP는 물 또는 다른 극성 용매에 잘 녹으며, 녹은 상태에서는 좋은 젖음성을 보여 손쉽게 필름화한다. 이러한 성질을 이용해 나노유체의 코팅이나 코팅 재료의 첨가제로 사용되며, 특히 탄소나노튜브를 순수 물에 효과적으로 분산시키는 것으로 알려져 있다. PVP를 이용하여 탄소나노튜브를 분산제의 적정 체적비가 존재하는 것으로 알려져 있으며 이보다 많거나 적은 양으로 분산을 할 경우 분산 안정도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 PVP의 적정 혼합 비율을 알아보기 위해 PVP를 탄소나노튜브 체적 대비 100 ~ 500 wt%를 첨가하여 나노유체를 제조하였다.

2.3 화학적 분산 방법(강산에서의 분산)

탄소 나노 튜브의 분산을 위해 탄소 나노 튜브의 표면에 화학적으로 처리를 한 기능기를 직접 부착시키는 방법이다. 산화 처리 방법은 흑연 구조 고유의 극성을 변화시켜 나노 입자간의 반데르발스 힘을 약화시킴으로써 분산이 효과적으로 이루어질 수 있도록 만들어 준다. 산화 처리 방법은 흑연 구조 고유의 극성을 변화시켜 나노 입자간의 반데르발스 힘을 약화시킴으로써 분산이 효과적으로 이루어질 수 있도록 만들어 준다. Figure. 5는 산처리된 탄소나노튜브를 제조하기 위한 실험 장치이다. 제조 방법으로는 황산(98%) 8ml와 질산(63%) 22ml를 혼합하여 제조된 제조액 30ml에 MWCNT 2g을 넣은 후 110℃에서 24시간 동안 교반 하였다. 교반 후 생성된 카르 복시기를 함유하는 산성 MWCNT를 탈 이온화된 물 1000ml와 섞어서 희석하여 PH7이 될때까지 세척과 여과의 과정을 반복하였다. 사용된 여과기는 감압 여과용 필터 홀더(KGS-47)를 사용하였고, 여과지는

어드벵텍사의 공극의 크기가 $0.2\mu\text{m}$ 인 친수성 PTFE 타입의 멤브레인 필터 (H020A047A)를 사용하였다. 그런 다음 MWCNT를 60°C 의 진공 건조오븐에서 48시간 정도 진공 건조하여 수분을 제거하여 산처리된 MWCNT를 1.7 g을 획득하였다. 그 후, 산처리된 탄소나노튜브의 체적분율을 변화시켜 나노유체를 제조하였다.[Shim et al, 2006.]



Figure. 5. The experimental apparatus of produce oxidation MWCNT.

3. 열전도도 측정

3.1 비정상 열선법

Nanofluid의 열전도도를 측정하기 위해서는 유체의 열전도율을 가장 정밀하게 측정하는 것으로 알려 졌으며 그 방법이 잘 개발된 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 주로 사용한다. Nanofluid에 포함되어 있는 물질은 주로 전기적으로 전도성이 있는 입자이며 물과 같은 유체의 경우에는 유체 자체에 전기

적 전도성이 있으므로 기존의 전기 절연성 유체에 적용되었던 비정상 열선법으로 그대로 사용할 수 없으므로 Nagasaka에 의해 제시된 비정상 열선법을 이용한 전기 전도성 유체의 열전도도 측정방법에 따라 측정하였다.[Nagasaka et al, 1983.] 비정상 열선법을 이용한 열전도도 측정 장치는 열선의 저항 변화를 검출하는 휘트스톤 브리지(wheatstone bridge)와 A/D변환기(혹은 계측기), 전압을 공급해주는 파워 서플라이, 데이터 저장을 위한 컴퓨터, 그리고 나노유체의 온도를 일정하게 유지하기 위한 항온수조로 구성되어 있다.

3.2 휘트스톤 브리지(wheatstone bridge)

휘트스톤 브리지는 정밀 저항을 측정하는 회로이다. 4개의 저항을 대칭으로 접속하여 Figure. 6과 같이 만들고 검류계를 설치하여 전압을 가하면 회로에 전류가 흘러 각 저항에 전압강하가 발생한다. 휘트스톤 브리지는 교류, 직류를 사용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

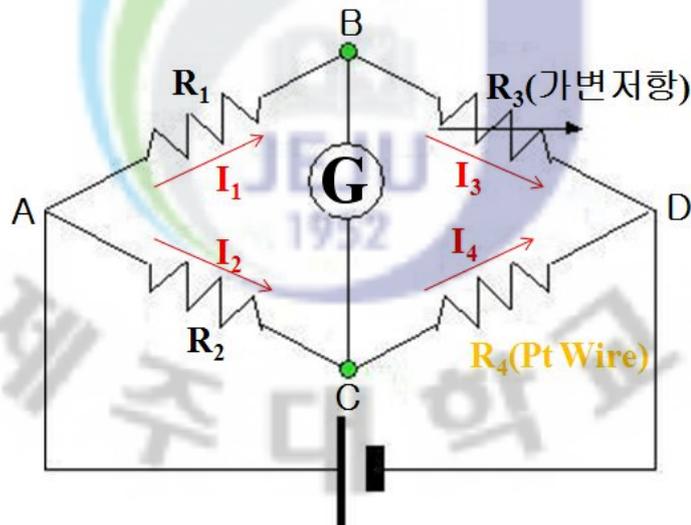


Figure. 6. Diagram of Wheatstone Bridge.

$$V_B = V_C, V_{AB} = V_{AC}, V_{BD} = V_{CD}$$

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2, I_3 \cdot R_3 = I_4 \cdot R_4$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_3, \quad I_2 = I_4 \\
 R_1 \cdot R_4 &= R_2 \cdot R_3 \\
 R_4 &= \frac{(R_2 \cdot R_3)}{R_1}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

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.

3.3 열전도도 측정 장치

Figure. 7 ~ 8은 본 실험에 사용된 휘트스톤 브리지의 개략도와 실험 장치의 사진이다. 10Ω, 10KΩ의 저항과 10KΩ의 가변저항, 그리고 테프론으로 코팅된 직경 76 μm, 길이 15 cm 백금선을 사용하여 휘트스톤 브리지를 제작하였다.

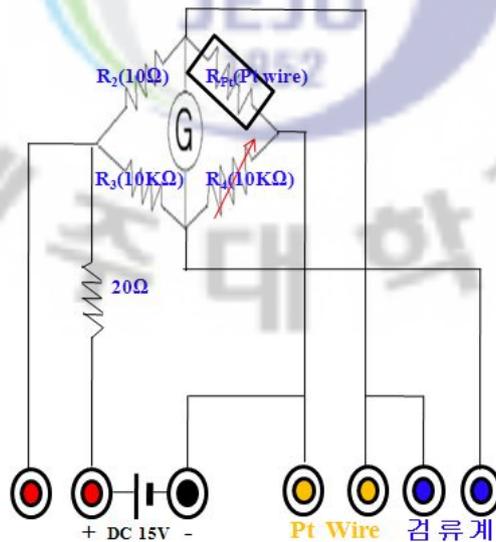


Figure. 7. Diagram of wheatstone bridge experimental apparatus.

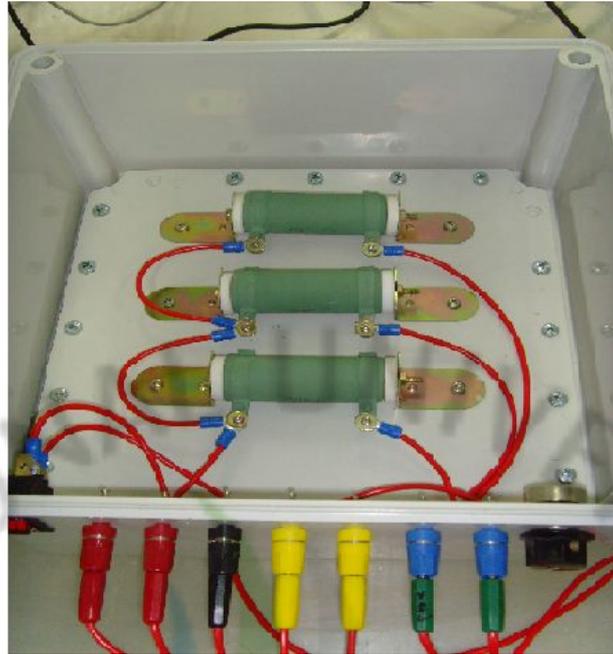


Figure. 8. Photograph of wheatstone bridge experimental apparatus.

Figure. 9는 본 실험에 사용된 백금선의 사진이다. 전기를 공급하는 전극에서는 불가피하게 축 방향으로 전도가 생기게 되어 열의 누설이 생기게 된다. 본 실험에서는 직경에 대한 길이의 비가 약 2400배 정도 되기 때문에 축방향의 열전달은 무시할 수 있다.



Figure. 9. Photograph of Pt wire.

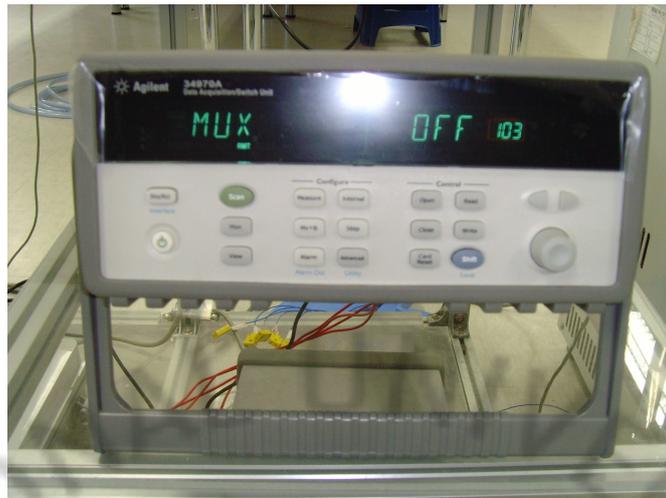


Figure. 10. Photograph of Data logger(34970A).

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 power supply(E3648A).

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

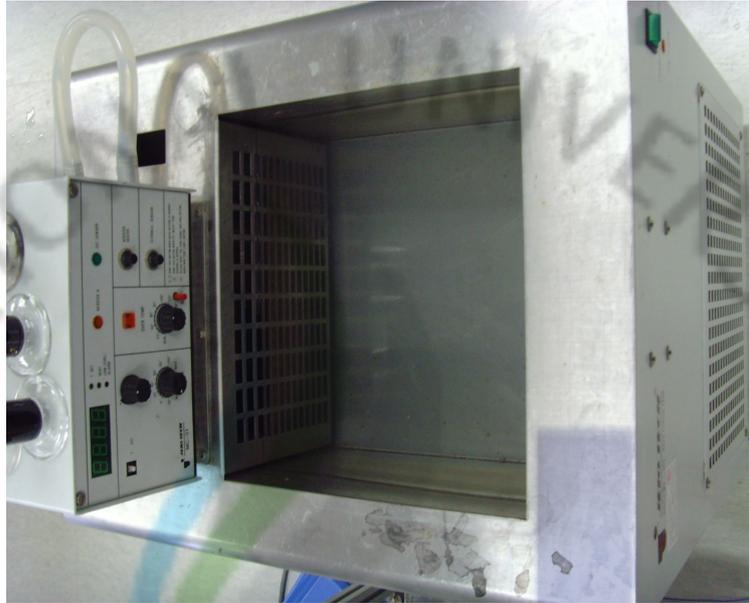


Figure. 12. Photograph of bath circulator.



Figure. 13. The measurement experimental apparatus of thermal conductivity.

나노유체의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 제이오 테크사의 저온 항은 수저인 RBC-30을 사용하였다. 수조의 용량은 30ℓ 이고 온도 범위는 -25℃ ~ 110℃ 까지 조절 가능하다. Bath내에 강력한 외·내부 순환 펌프를 장착하여 온도 분포의 정밀도가 좋고, 펌프 용량은 25LPM이다. Figure. 13은 실험장치의 전체적인 모습을 나타낸 사진이다.

4. 열전도도 측정 방법

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 발생된 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 $0.0039092 / ^\circ\text{C}$ 를 사용하였다.

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

α : $0.0039092 / ^\circ\text{C}$ (백금선의 온도 - 저항 계수)

여기서 R 은 백금선의 온도 T 에서의 저항이며, R_0 는 0°C 에서의 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 T 는 시간 t 에서 열선의 온도이며, q 는 열선에 가해지는 전력, K 는 유체의 열전도도, a 는 유체의 열 확산 계수, a 는 열선의 반지름, C 는 상수이다. 식 (5)를 무한급수로 전개하여 열전도도에 대하여 정리하면 최종적으로 열전

도도 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, T_1 , T_2 는 각각 시각 t_1 , t_2 에서 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, q는 식(8)로 계산 할 수 있다.

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

5. 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 값

을 측정하였다. 측정된 데이터는 시리얼 포트를 통하여 컴퓨터로 보내지게 되고, 점도계 전용 프로그램인 Rheocalc V3.0을 통하여 데이터를 저장하였다. Figure. 14는 나노유체 점도 측정에 사용된 회전형 디지털 점도계 DV II+pro의 사진이고 Figure. 15는 점도 측정장치의 전체적인 모습을 나타낸 사진이다.



Figure. 14. Photograph of viscometer(DV II+pro).



Figure. 15. The measurement experimental apparatus of viscosity.

IV. 실험 결과 및 고찰

1. 열전도도 측정

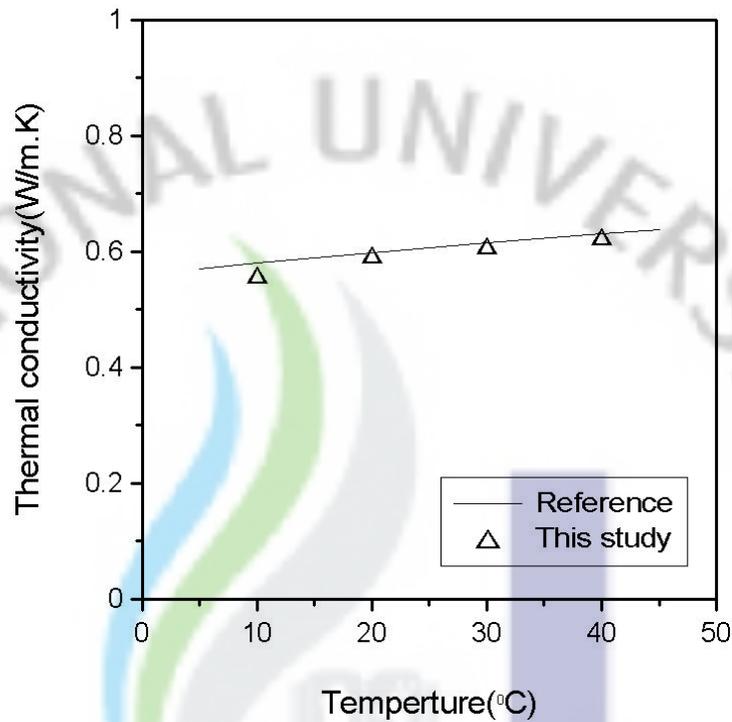
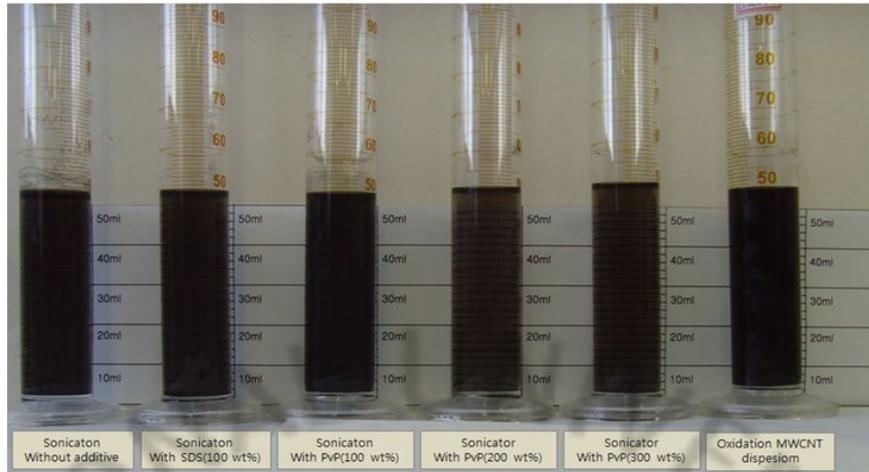
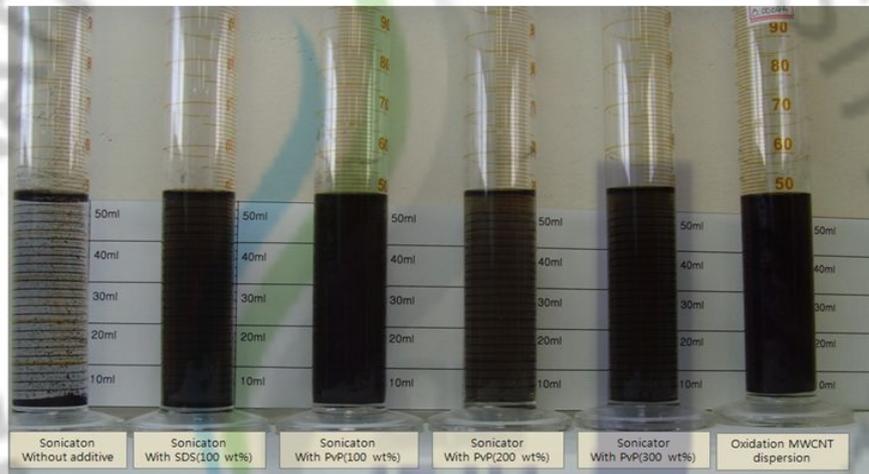


Figure. 16. Validation of water to measure the thermal conductivity of the base fluid.

Figure. 16은 실험장치의 타당성을 알아보기 위해서 기존에 보고된 증류수의 물성 데이터와 본 실험 장치를 이용하여 측정된 증류수의 열전도도를 나타낸 그래프이다. 물의 물성치 데이터는 CRC Handbook of Chemistry and Physics에 나와 있는 데이터를 사용하였으며, 실험 결과 문헌값과 1% 이내의 편차로 실험 데이터가 일치하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 본 실험 장치는 비교적 정확하게 만들어 졌다고 할 수 있다.



(a) photograph of after sonicator dispersion.



(b) photograph of 2 hour elapsed time.

Figure. 17. Various nanofluids sedimentation by elapsed time.

Figure. 17은 탄소나노튜브 0.001 vol%에 체적 대비 SDS 100 wt%와 PVP 100 ~ 300 wt%, 산처리된 탄소나노튜브를 첨가하여 2시간 동안 초음파 분산한 사진이다. 분산을 끝낸 직후 탄소나노튜브가 증류수에 전부 비슷하게 분산되었지만, 2시간이 지난 후 살펴보면 탄소나노튜브만 혼합하여 초음파 분산한 경우 탄소나노튜브가 거의 다 가라앉는 것을 볼 수 있다. 이것은 탄소나노튜브를 분산하기 위해서는 기계적 분산방법만 가지고는 장시간 분산이 안 된다는 것을 의미한다. 따라서, 오랫동안 안정적인 분산을 하기 위해선 SDS나 PVP를 첨가하거나 산처리해서 분산시키는게 좋다는 것을 알 수 있다.

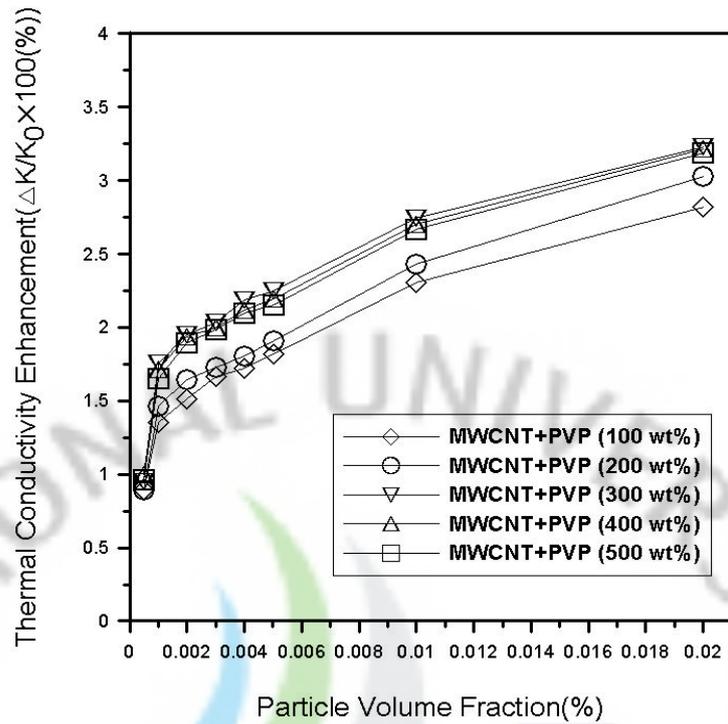


Figure. 18. Thermal conductivity of MWNT as a PVP fraction.

Figure. 18은 PVP의 적정 무게분율을 알아보기 위해서 첨가된 탄소나노튜브 체적 대비 PVP를 100 ~ 500 wt% 까지 변화시키면서 측정한 열전도도를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 무게분율이 올라 갈수록 열전도도가 점점 증가하지만, 300 wt%이상이 되었을 때에는 더 이상 증가하지 않고 300 wt%를 첨가 하였을 경우와 비슷하거나 약간 감소하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 PVP를 혼합할 경우 가장 적절한 무게분율은 첨가된 탄소나노튜브 체적 대비 300 wt%가 되는 것을 알 수 있었다.

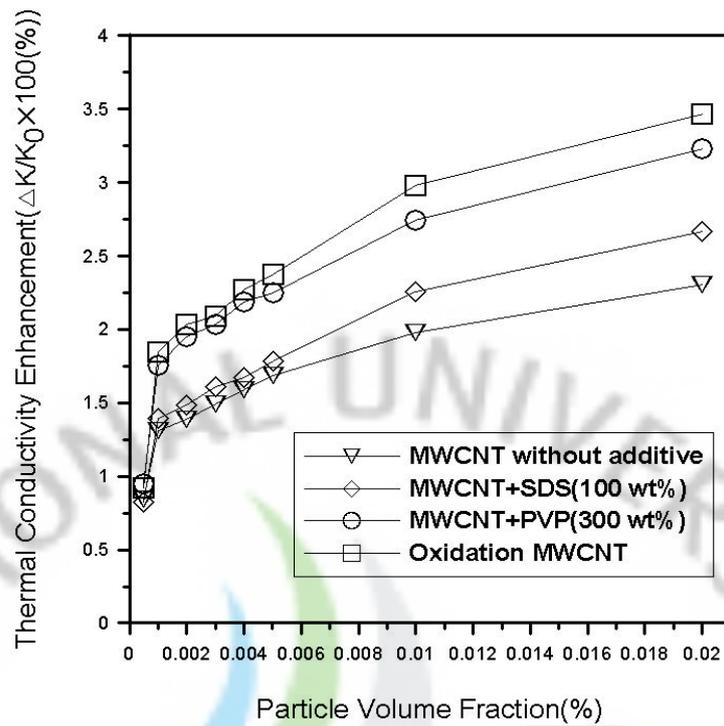


Figure. 19. Comparison of the thermal conductivity as a dispersion.

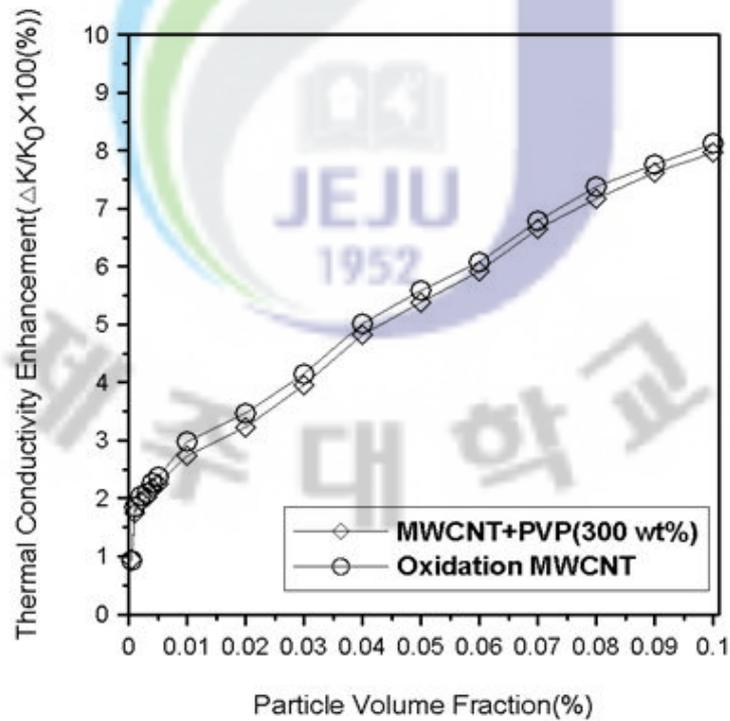


Figure. 20. The thermal conductivity as a particle volume fraction.

Figure. 19는 탄소나노튜브, SDS 100 wt%, PVP 300 wt%를 첨가한 나노유체와 산처리된 나노유체의 열전도도를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 PVP를 첨가한 나노유체와 산처리된 탄소나노유체의 경우 SDS를 첨가하여 제조한 탄소나노튜브보다 열전도도가 우수하다는 것을 알 수 있었고, 산처리된 탄소 나노유체가 가장 좋은 열전도도를 나타 내었다. Figure. 20은 열전도도가 우수한 나노유체의 체적분율을 0.1 vol%까지 증가시켜 열전도도를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, 0.1 vol%까지 증가시켜도 산처리된 탄소나노유체의 열전도도가 조금 더 우수한 것을 알 수 있었다. 또한, PVP를 첨가한 나노유체와 산처리된 나노유체 둘 다 0.001 vol%까지 열전도도의 증가가 급격하게 이루어진 이후 첨가된 탄소나노튜브의 체적분율과 비례하여 완만하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 유체에 소량의 탄소나노튜브를 첨가하여도 열전도도가 증가한다는 것을 알 수 있었다.

2 점도 측정

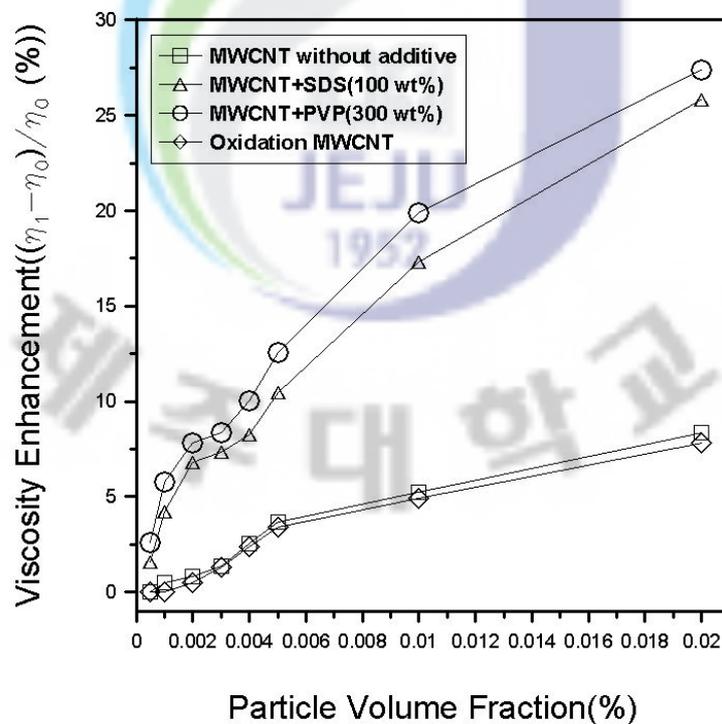


Figure. 21. Comparison of the viscosity as a dispersion.

Figure. 21은 탄소나노튜브와 탄소나노튜브에 100 wt% SDS와 300 wt% PVP를 첨가한 나노유체, 산처리된 나노유체의 점도를 측정된 그래프이다. 그림에서 보는 것과 같이 탄소나노튜브에 첨가제를 혼합하여 분산하였을 경우 분산은 잘 이루어지지만 나노유체의 점도가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 분산제를 첨가하지 않은 탄소나노유체와 산처리된 탄소나노유체의 점도가 비슷한 것을 알 수 있었다. 따라서, 산업적인 목적으로 사용하기 위해서는 열전도도가 우수하고, 점도가 크게 증가하지 않는 화학적 개질에 의한 분산 방법을 이용해야 된다고 사료 된다.

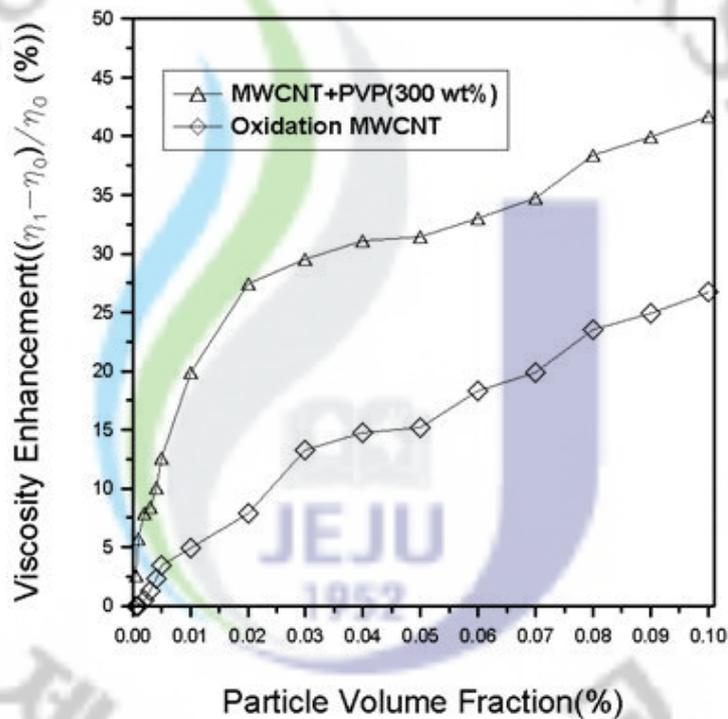


Figure. 22. The viscosity as a dispersion particle volume fraction.

Figure. 22는 탄소나노튜브의 체적분율을 0.1 vol%까지 증가시키면서 측정된 점도 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 PVP를 첨가한 나노유체는 0.02 vol%까지 점도가 급격하게 증가하다가, 이 후 증가되는 경향이 둔화되는 결과를 보이고 있고, 산처리된 탄소나노유체는 0.005 vol%까지 급격히 증가하다가, 이 후 둔화되는 경향을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 연구는 여러 가지 산업 분야 및 열교환기 작동유체로서의 가능성을 알아보기 위해 나노유체의 특성을 살펴 보고자 하였다. 비정상 열선법을 이용하여 나노유체의 열전도도를 측정하고, 디지털 회전형 점도계를 통하여 나노유체의 점도를 측정하였다. 나노유체의 열전도도 및 점도는 입자 체적 분율을 변수로 하여 측정을 수행하였으며, 분산 방법에 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 기본 유체 및 나노유체의 열전도도를 측정할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 물의 온도에 따른 열전도도 데이터는 CRC Handbook of Chemistry and Physics에 나와있는 열전도도와 비교하였을 때 오차 범위 1% 이내로 일치하는 것을 보았을 때, 비교적 정확한 시스템을 구축하였다.

(2) 나노유체와 PVP의 적정 혼합 비율을 알아보기 위해 PVP를 100 ~ 500 wt% 첨가한 결과, 무게분율이 올라 갈수록 열전도도가 점점 증가하지만, 300 wt% 이상이 되었을 때에는 더 이상 증가하지 않고 300 wt%를 첨가하였을 경우와 비슷하거나 약간 감소하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 PVP를 혼합할 경우 가장 적절한 무게분율은 첨가된 탄소나노튜브 체적대비 300 wt%가 되는 것을 알 수 있었다.

(3) 분산방법에 따른 열전도도를 비교 하여 보았을 때, 300 wt%의 PVP를 첨가한 나노유체와 산처리된 탄소나노유체가 선행연구에서 제시한 100 wt%의 SDS보다 열전도도가 우수하다는 것을 알 수 있었고, 산처리된 탄소나노유체의 열전도도가 가장 우수함을 알 수 있었다. 또한, 탄소나노튜브 첨가 하였을 때, 0.001 vol%까지 열전도도가 급격히 증가하므로 유체에 소량의 탄소나노튜브를 첨가하여도 열전도도가 증가한다는 것을 알 수 있었다.

(4) SDS, PVP등 첨가제를 혼합하여 나노유체를 제조하였을 경우 첨가제를 넣지 않은 나노유체보다 점도가 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 산처리된 탄소나노유체는 첨가제를 집어 넣지 않은 탄소나노유체와 점도가 비슷한 것을 볼 수 있었다. 따라서 여러 가지 산업적인 분야 및 열교환기의 작동유체로서 사용하기 위해서는 열전도도가 우수하고 기본유체에 비해 점도가 크게 증가하지 않는 화학적 개질에 의한 분산방법으로 나노유체를 제조하고 이용해야 된다고 사료된다.



참 고 문 헌

Assael, M.J., Chen, C.F., Metaxa, I. and Wakeham, W.A., 2004, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, *International Journal of Thermophysics*, 25, 971-984.

A. Star, J. F. Stoddart, D. Steurman, M. Diehl, A. Boukai, E. W. Wong, X. Yang, S. W. Chung, H. Choi, J. R. Heath, *Angew., 2001, Chem. Int. Ed.* 40, 9, 1721.

A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Die, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y. H. Lee, S. G. Kim, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, G. E. Scuseria, D. Tomanek, J. E. Fischer, R. E. Smalley, 1996, *Science*, 273, 483.

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

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

Choi, S.U.S., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Development and Applications of Non-Newtonian Flows*, ed. by singer, D.A. and wang, H.P., ASME New York, 231, 474-480.

Choi S.U.S., Zhang Z.G., Yu W., Lockwood F.E., Grulke E.A., 2001, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, *Appl. Phys. Lett.*, 79, 2252-2254.

D.R. Lide, Ed., 2008 CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 89th ed. 6-2.

Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S. Yu, W. and Thompson, L. J., 2001, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Applied Physics Letter, 78, 718-720.

E. Hernandez, C. Goze, P. Bernier, A. Rubio, 1999, Applied Physics A, Materials Science & Processing 68, 287.

E. W. Wong, P. E. Sheehan, C. M. Lieber, 1997, Science, 277, 1971.

G. Gao, T. Cagin, W. A. Goddard III, 1998, Nanotechnology, 9, 184.

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.

H. W. Kroto, J.R Heath, S.C. O'brien, R.F. Curl, R.E. Smalley, 1985, Nature 318, 6042.

Jiang, L., Gao, L. and Sun, J., 2003, Production of Aqueous Colloidal Dispersions of Carbon Nanotubes, Journal of Colloid and Interface Science, 260, 89-98.

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

J. P. Salvetat, A. J. Kulik, J. M. Bonard G.Andrew, D. Briggs, T. Stockli, K. Metenier, S. Bonnamy, F. Beguin, N. A. Burnham, L. Forro, 1999, Advanced

Materials, 11, 161.

L. Henrard, E. Hernandez, P. Bernier, A. Rubio, 1999, Physical Review B60, 12, R8521.

M. M. J. Treacy, T. W. Ebbesen, J. M. Gibson, 1996, Nature, 381, 67.

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.

O'connell, M.J., Boul, P., Ericson, L.M., Huffman, C., Wang, Y., Haroz, E., Kuper, C. Tour, J., Ausman, K.D. and Smalley, R.E., 2001, Reversible water-solubilization of single-walled carbon nanotubes by polymer wrapping, Chemical Physics Letters, 342, 265-271.

Riggs, J. E., Guo, Z., Carroll, D. L. and Sun, Y. P., 2000, Strong luminescence of solubilized carbon nanotubes, Journal of the American Chemical Society, 122, 5879-5880.

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

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

S. Frank, P. Poncharal, Z.L. Wang, W.A. de Heer, 1998, Science, 280, 1744

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

S. Sanvito, Y. K. Kwon, D. Tomanek, C. J. Lambert, 2000, Phys. Rev. Lett. 84, 1974.

Wang, X. Q., Mujumdar, A. S., 2007, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, Int. J. thermal Sciences, 46, 1-19.

Wang, X., Xu, X., Choi, S. U. S., 1999, Thermal conductivity of nanoparticle fluidmixture, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13, 4, 474-480.

Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of Heat and Fluid flow, 21, 58-64.

Xie H., Wang Jinchang, Xi Tonggeng, liu Yan, Ai Fei, Wu Qingren,, 2002, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, J. Appl. Phys., 91, 7, 4568-4572.

Xie, H., H. Lee, W. Youn and M. Choi, 2003, Nanofluids containing jwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities Journal of Applied Physics 94, 4967-4971.

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

황유진, 2007, “나노유체의 제조 및 물성치 특성에 관한 연구”, 부산대학교 공학 박사 학위논문

김기일, 강현무, 김강희, 손종구, 배상진, 2002, “국가전략산업분선-탄소나노튜브” 한국 과학 기술 정보 연구원

감사의 글

2년의 세월을 통해 이제는 하나의 작은 결실을 마무리 지었습니다. 석사 학위 논문을 무사히 낼 수 있도록 관심과 도움을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 전합니다.

우선, 많이 모자란 저를 학부생 때부터 많은 가르침과 도움을 주시고 깊은 애정과 관심으로 지도해주신 김남진 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다. 아울러 논문의 검토와 심사를 하면서 세심한 배려와 많은 학문적 가르침을 주신 이윤준 교수님과 천원기 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

에너지 공학과란 한 울타리 안에서 많은 시간을 보내면서 항상 많은 조언과 격려를 아끼지 않은 준호형, 지훈이형, 상범이형, 민기형, 정성이형, 순일이형, 승진이형, 봉진이형, 민우형, 민국이형에게도 지면을 빌어 감사의 뜻을 전합니다. 그리고 언제나 옆에서 도와주고 힘이 되어주었던 동기 성식, 원종, 영민, 지훈, 학범이, 01학번 동기들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한, 같은 실험실에 있으면서 항상 저를 도와주었던 찬호, 정수, 용식, 진호, 길범, 응진, 창우에게도 못한 선배를 잘 따라줘서 고맙다는 말을 전하고 싶고, 에너지 공학과의 모든 선배님과 후배들에게도 감사의 마음을 전합니다. 그리고, 제가 힘들 때 옆에 있어주었던 우리 한·사·모 친구들에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 한결같은 사랑과 믿음으로 자식을 걱정하시는 부모님과 항상 따뜻함과 인내로 나를 감싸주고 큰 힘이 되어 주었던 향숙이누나에게 진심으로 감사드립니다. 저를 사랑해주시고 아껴주신 모든 분들께 이 논문을 드립니다.