

해설논문

(Special issue)

## 나노유체와 기계장치에의 응용

# Nano Fluid and its Application in Mechanical Devices



정 호 민

Hyo-Min Jeong

· 경상대학교 교수

· hmjeong@gnu.ac.kr

### 1. 서 론

나노(Nano)는 그 크기가 10억분의 1미터의 단위로서 최근 들어서 나노기술(Nano Technology)의 용어가 매우 친근감 있게 사용되고 있다. 특히 최근에는 나노에 관련한 연구분야는 융복합 학문의 정점에 와 있는 것이 보편화된 사실일 것이다. 즉 나노기술은 물리화학을 기초로 하여 최근에는 기계공학분야에서도 심심찮게 엿볼 수 있는 분야이다. 사물은 보는 입장에서 매크로(Macro), 마이크로(Micro), 나노(Nano)의 레벨에서 한정되어 생각한다면 매우 편협적이고 학문의 발전이 매우 더디게 마련이다. 다행히도 최근에는 학문적 경계가 불분명할 정도로 나노의 기술이 산업 전반에 침투 되고 있다.

본 연구에서는 나노기술의 여러분야중에서도 열유체공학과 관련한 나노기술이 기계공학 분야에 어떻게 활용되고 있는지를 간단히 살펴보고자 한다. 나노유체(Nanofluids)는 일반 유체에 나노입자(nanoparticle), 탄소나노튜브(CNTs: Carbon

nanotubes)와 같은 나노 크기의 입자들을 분산(dispersion), 부유(suspension) 시켜서 만든 유체를 말한다. 1993년 미국 Argonne National Lab.의 Dr.Choi 팀은 일반유체에 나노기술로 제작된 나노 입자를 첨가하면 새로운 물성치를 지닌 유체가 될 것이라는 아이디어를 제시하였으며 1995년 이론적 결과를 최초로 발표하였고, 일반유체에 나노 입자들을 분산 부유시킨 유체를 나노유체라 명명하고 이후 연구자들에 의해서 그들의 실험 결과들은 확인되었고 최근에는 차세대 냉각유체로 나노유체를 사용하여 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다.

### 2. 탄소나노튜브 및 나노유체의 개요

탄소나노튜브(Carbon Nanotubes, CNTs)는 1991년 일본의 회사(NEC)에서 발견한 것으로서 지름이 수 나노미터(nm)에 불과하고 강도는 철보다 100배 이상 높고 알루미늄보다 2배 이상 가벼운 물질이다. 또 어떤 금속보다도 전류나 열을 많이

운송할 수 있으며, 수소를 저장하거나 전자파를 막기도 한다. 반도체 성질을 띠어 데이터 저장장치나 트랜지스터와 같은 전자소자에도 이용이 가능하다. 탄소나노튜브는 전자소자, 바이오 센서, 가스센서, 전도성 투명전극, 탄소나노튜브 전계 발광소자 등 다양한 제품에 응용이 가능하며, 최근에는 열유체분야에서도 다양한 적용성을 발휘하고 있다. 탄소나노튜브는 크게 2종류로서 단일벽 탄소 나노튜브(Single-layer Wall : SWCNT)와 다중벽 탄소나노튜브(Multi-layer Wall: MWCNT)으로 구분되며 산업용으로는 비교적 제조공법이 까다롭지 않고 다량생산이 가능한 MWCNT가 많이 사용되고 있다. 열수송의 매개체로서 사용되는 탄소나노튜브는 CVD(chemical vapor deposition) 제조법으로 만들어진 순도 97%의 다중벽 탄소나노튜브로서 길이는 10~50  $\mu\text{m}$ , 직경은 10~20 nm로서 탄소나노튜브를 물 또는 다양한 유체에 분산, 부유시켜 열효율을 대폭적으로 향상시키고 있다.

### 3. 국내외의 관련 연구 동향

#### 3.1 연구 동향 분석

나노유체 관련한 연구 발표 현황을 분석하기 위하여 국내외의 관련 연구는 “나노유체” 및 “Nanofluid”의 색인어를 이용하여 국내는 www.dbpia.co.kr, 국외는 www.sciencedirect.com에서 검색하여 보았다. 최근 5년간으로 한정된 결과 전체 논문수는 국내가 약 110건 국외가 약 920건으로서 국내의 나노유체 관련 연구 실적은 국외에 비하여 약 10배정도의 양적인 열세를 나타내고 있다. 나노유체의 연구는 새로운 나노유체 개발→나노유체의 기초특성 연구(열물성치 분석, 입자의 분산 및 용해특성 도출)→ 열전달 및 시스템 적용 실험<sup>(2)~(4)</sup>이 가장 일반적인 연구개발 순서로 진행되어야 한다. 그러나 국내의 경우는 나노유체의 개발 및 기초특성 연구분야는 총 110여편 중 약 10편인 약 10%정도로서 아주 열악한 기초연구의 실적을 나타내고 있다. 국외의 경우는 전체의

나노유체 관련 연구중에서 약 40%정도의 연구가 나노유체의 기초특성 연구(열물성치 분석, 입자의 분산 및 용해특성 도출)에 집중되어 있고 특히 수치해석적인 접근이 많은 것을 알 수 있으며, 나머지인 약 60%가 열전달 및 시스템 적용 실험으로서 전체적인 연구방향 및 연구의 집중도에 있어서 편향되지 않음을 알 수 있다. 특히 열전도도 측정분야는 타 연구항목에 비하여 적은 비율(약 6%)을 점하고 있으며 이에 대하여 국내의 경우는 약 30%를 점하고 있다. 이것은 기존 개발된 나노유체에 대한 열전도율만의 측정으로서 나노유체 분야의 특이한 연구 항목으로는 볼 수 없어 단순한 양적인 목적의 연구동향으로 분석되고 있다. 대부분의 연구분야가 열전도도 측정 및 열전달 분야(전체 대비 약 70%)에 한정되어 있다는 것은 기초가 매우 빈약한 상태에서 곧바로 실 시스템 적용 및 응용 연구에만 집중하고 있음을 의미하며 앞으로도 국내에서 이에 관련한 기초 연구 및 응용연구가 강력히 요구되고 있다.

#### 3.2 국외 나노유체 관련 세부 연구 분야

나노유체에 관련한 저명 외국 연구자의 세부 연구동향은 Xiang-Qi Wang등에 의한 연구 논문<sup>(1)</sup>에 잘 요약되어 있다. 다음의 표는 참고문헌의 나노유체의 열전도, 대류열전달 및 비등열전달에 관한 주요 내용 및 요약을 나타 내었다. 즉, 국외 연구의 세부 연구분야는 다음과 같이 재 요약할 수 있다.

(1) 나노유체의 열전도 분야 : 대부분 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )에 대한 연구로서 주로 물에 부유시켜 약 12~60% 효율 상승 및 탄소나노튜브는 약 30~250%정도 효율 상승에 대한 연구가 주류임.

(2) 나노유체의 대류 열전달 분야 : 다양한 나노입자에 대한 강제대류 및 자연 대류하에서의 열전달 변화에 대한 보고 임.

(3) 나노유체의 비등 열전달 분야 : 대부분 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )와 물에 대한 것으로 임계 열유속을 중심으로 분석 보고 한 것으로서 경우에 따라서는 약 200%정도 까지도 효율 상승 연구보고 임.

Table 1. Convective Heat transfer of Nano fluids  
(주: EG:에틸렌 글리콜, PO: 펌프 오일, DW:달이온 물)

연구자	입자	크기 (nm)	사용 유체	주요 결과
Li and Peterson	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Cu O	36/29	water	체적분율 및 온도에 따라 향상
Eastman et al.	Cu	<10	EG	0.3 vol% 의 Cu-based 나노유체에서 40% 향상
Hong and Yang	Fe	10	EG	0.55 vol% 의 Fe/EG 나노유체에서 18% 향상
Murshed et al.	TiO <sub>2</sub>	∅ 10 × 40, ∅ 15	DW	5 vol% 일때 ∅ 10 × 40 과 ∅ 15 각각 33% 와 30% 증가
Choi et al.	MWNTs	∅ 25 × 50 μm	oil	1.0 vol% 일때 250%
Biercuk et al.	SWNTs	∅ 3-30	epoxy	1.0 wt% 일때 125%
Xie et al.	TCNTs	∅ 15 × 30 μm	DW, EG	1.0 vol% 일때 TCNT, EG, DW 각각 19.6%, 12.7%, 7.0% 향상
Choi et al.	SWNTs	∅ 20-30 × 200	epoxy	3 wt% SWNT 넣었을때 300%
Wen and Ding	CNTs	∅ 20-60 × ~10 μm	water	0.84% CNT 농도일때 20℃ 에서는 23.7%, 45℃ 에서는 31% 향상
Assael et al.	MWNTs, DWNTs	∅ 130 × 10 μm	water	0.6 vol% 부유상태 일때 34% 증가
Liu et al.	CNTs	∅ 20-30	EG, EO	EG 1 vol% 일때 12.4%, EO 2 vol% 일때 30%

### 3.3 나노유체의 열전달 메카니즘

실제의 열교환 기계장치에서 나노입자를 이용한 나노유체를 사용하는 목적은 유동장에서의 저항요소(예, 압력저항)를 최소화함과 동시에 높은 열전달 능력을 가져야 한다. 또한 장시간 가동하지 않은 경우에도 유체에 고른 분산과 부유의 성질을 띠게 하므로써 입자의 침전에 의한 부적절함과 열수송장치의 표면침식과 같은 현상을 회피할 수 있다. 특히, 탄소나노튜브의 표면적은 약

100~700 m<sup>2</sup>/g으로서 고효율의 열을 전달하는 구조이기도 하다. 나노유체(Nanofluid)의 열전달은 다음 그림과 같이 크게 4가지 형식으로 이루어지고 있다. 즉, 유체분자와 나노입자간의 충돌(Mode 1), 나노입자내의 열확산(Mode 2), 나노입자의 움직임에 의한 열의 간접효과(Mode 3) 및 나노입자간의 충돌로 인한 열의 수송 방식이다.

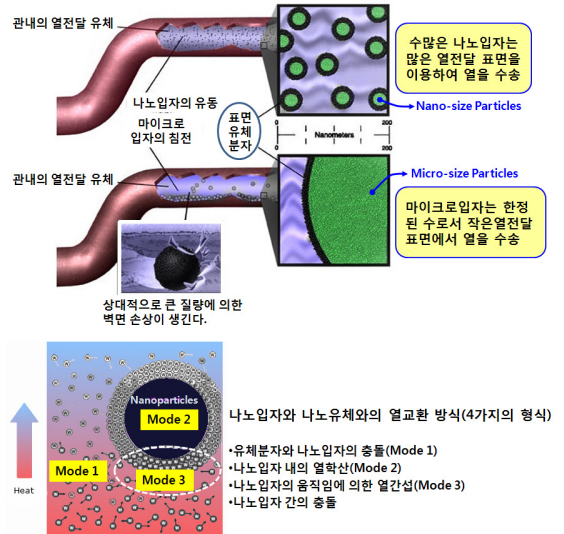


Fig. 1 Heat transfer mode in Nano Fluid

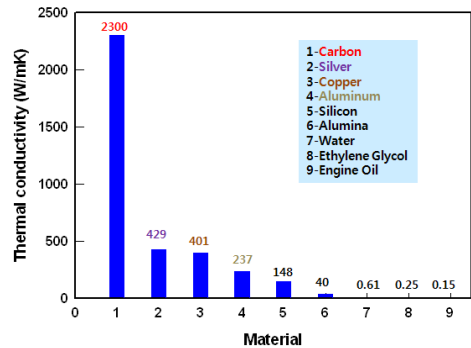
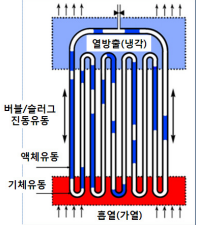



Fig. 2 Thermal conductivity in various materials

특히, 그림2는 각종 물질의 열전도 계수를 나타내고 있다. 이 자료에서 보는 바와 같이 탄소나노튜브의 여러 가지 성질 중에서 열적인 측면의 우수성을 포함하고 있어 이러한 성질을 유체공학

Table 2. Comparison of Pulsated and conventional heat pipe

	진동형 히트파이프	일반 히트 파이프
항목		
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>중력의 영향이 거의 없음</li> <li>자유로운 설치 형태</li> <li>내부에 Wick이 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>중력의 영향이 있음</li> <li>수직형으로 한정됨</li> <li>Wick을 설치해야함</li> </ul>
열매체 순환 방식	<ul style="list-style-type: none"> <li>작동유체의 액체 및 기체 동시 순환 방식</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>작동유체의 액체만 순환</li> </ul>
열교환 방식	<ul style="list-style-type: none"> <li>액체순환: 현열 수송</li> <li>기체순환: 잠열 수송</li> <li>2가지 방식으로 열을 동시수송</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>액체순환: 현열수송</li> <li>1가지 방식으로만 열을 수송</li> </ul>
설치 용량	<ul style="list-style-type: none"> <li>세관의 길이변경으로 다양한 용량 설치 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>단일 관이므로 병열 등의 장치가 부가됨</li> </ul>

이나 기계장치에 활용하는 방안이 있을 수 있는 것이다<sup>(6),(7)</sup>.

본 연구에서는 현존의 나노유체보다도 안정되고 열물성치가 뛰어난 나노유체로서 탄소나노튜브를 사용한 예를 보고하고자 한다. 물론 순수한 탄소나노튜브외에도 다양한 복합체를 이용할 수도 있다. 여기서는 실제의 열수송 기계장치의 열매체로서 실험한 예를 나타내고자 한다. 본 연구에서는 진동형 히트파이프의 열매체로서 나노유체를 적용시키는 연구의 일부를 살펴 보고자 한다.

### 3.4 나노유체의 열성능 시험법

열을 수송하는 장치에서 활발히 이용되고 있는 나노유체의 기본 성능은 원 재료의 다양한 제조 특성에 크게 좌우된다. 즉 제조된 나노유체의 열적 성능<sup>(8),(9)</sup>을 조사하기 위한 다음과 같은 전처리 연구가 반드시 필요하다.

#### (1) 대류 열전달 계수의 측정

유동상태에 따른 나노유체 적용 열전달 계수는 다음의 표와 같이 요약되며 본 실험 진행시 관련되는 유동상태 변화에 의한 비교검토를 실시한다.

Table 3 Nusselt number by previous researchers

연구자	상관식	비고
Pak and Cho(1998)	$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.5}$	
Xuan and Li(2003)	$Nu = 0.0059(1.0 + 7.6286 \phi^{0.6886} Re_p^{0.001}) Re_{nf}^{0.9238} Pr_{nf}^{0.4}$	난류 유동시
Buongiorno(2006)	$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re_b - 1000)Pr_b}{1 + \delta_v^+ \sqrt{\frac{f}{8}(Pr_v^2 - 1)}}$	$\delta_v^+$ 는 경계층 수치
Maiga et al.(2006)	$Nu_{fd} = 0.085 Re^{0.71} Pr^{0.35}$	완전 발달 난류영역시

#### (2) 압력저하 성능 선도의 도출

열전달 성능과 압력저하는 일반적으로 반비례하므로 반드시 압력 저하 특성을 고려하여야 한다. Colebrook 수식(벽면 마찰계수에 의한 압력저하 수식:  $f = \frac{\Delta p \cdot D}{L \cdot \rho u^2} \cdot \frac{2}{\rho u^2}$ ,  $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \text{Log}(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}})$ )에 의한 특성 비교 검토를 실시한다.

#### (3) 주요 실험 파라메타

나노유체의 농도 변화에 대한 열전달 계수의 변화, 열 열량(heat flux) 변화에 대한 특성 변화, 유속변화에 대한 열전달 계수의 변화등을 실험하여야 한다.

(4) 기타 물리화학적 성능 실험

나노 유체의 기본 물질은 나노크기의 고형분에 의한 특성이 매우 중요하여 다양한 물리화학적 실험이 필요하다. 그림3,4,5처럼 기계적인 가공, UV광흡수성 및 계면활성제<sup>5)</sup>에 의한 효과 등이 검증되어야 한다.

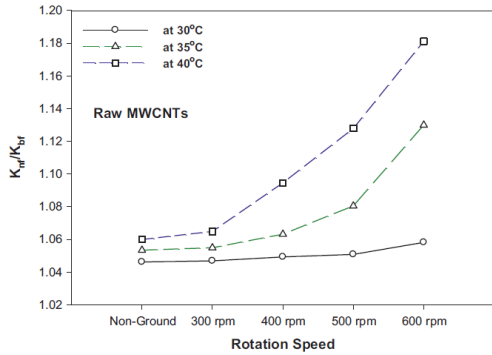


Fig. 3 Thermal conductivity on mechanical process(Planetary Ball Mill)

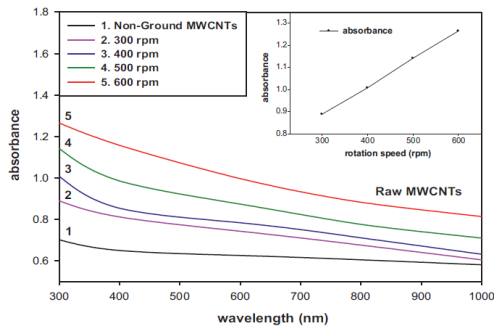


Fig. 4 UV-Absorbance on Planetary Ball Mill process

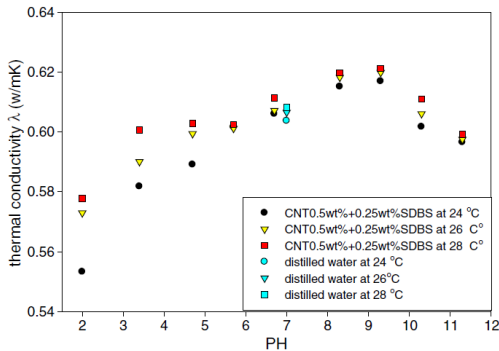


Fig. 5 Thermal conductivity on SBD and SDBS

4. 나노유체의 히트파이프 성능 변화

지금까지의 나노유체에 대하여서는 기본적인 열전도계수의 변화를 비롯하여 물리 또는 화학적 변화등에 대한 실험적 자료를 축적한 후에 실제적인 기계장치에의 접근을 시도한 예를 나타내고자 한다. 그림6과 그림7은 히트파이프의 실험장치를 나타내고 있다.

그림8은 히트 파이프의 내부의 유동상황을 정성적으로 나타낸 것이다. 이 실험값은 미세 압력계를 사용하여 히트 파이프 관내부의 유동현상을 파악하기 위한 것으로서 높은 열을 가하면 내부의 유체유동이 매우 고주파의 형태로 움직이는 것을 알 수 있어 이에 대한 나노유체의 역할을 정성적 또는 정량적인 평가를 할수 있다.

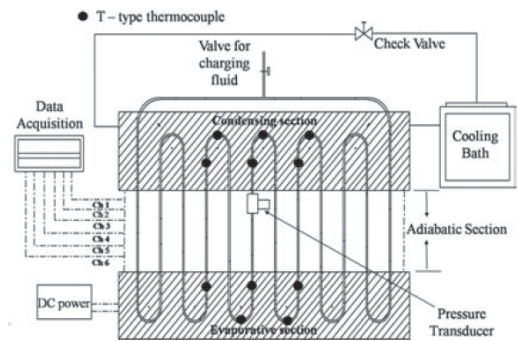


Fig. 6 Experiment set-up for heat pipe with nano fluid.

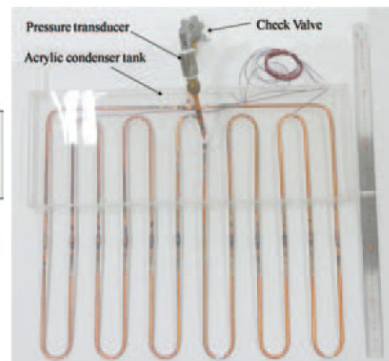


Fig. 7 Experimental photo of heat pipe with nano fluid.

그림9는 히트 파이프의 성능 지표는 가해진 열량에 대하여 증발측과 응축측의 온도차(열저항계수, R)를 나타낸 것이다. 즉 증발측의 가열열량이 적을 경우는 히트파이프의 열전달이 적음을 나타낸다. 즉 이러한 경우는 히트파이프의 열전달이 매우 더디다는 것의 정량적인 표현이다. 반대로 높은 열량이 가해지면 열 저항이 낮아져서 상대적으로 매우 열전달이 빠르게 진행함을 나타내고 있다. 특히 본 실험에서는 순수(DI water)에 대하여 다양한 나노유체를 사용함에 따라서 전 영역에서 매우 성능이 좋은 히트파이프의 설계가 가능함을 보여주는 좋은 결과라 할 수 있다.

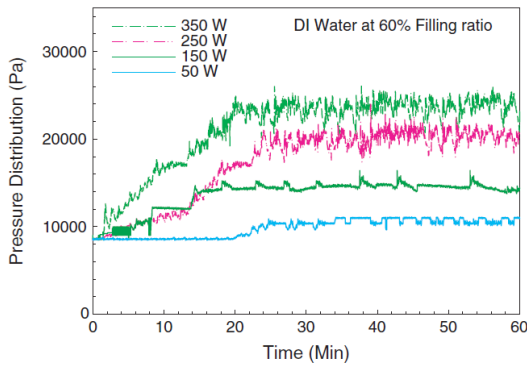


Fig. 8 Pressure fluctuation in heat pipe

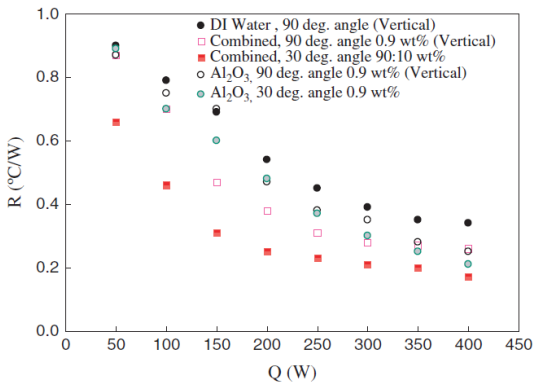


Fig. 9 Thermal resistance of heat pipe with various nano fluid filling

## 5. 결 론

최근의 나노기술은 특정한 분야에서만 가능한

것이 아닌 복합학문에서 다루어져야 할 매우 흥미로운 연구 분야이다. 본 연구에서는 단편적인 나노유체분야의 극히 일부분을 서술하였지만 보다 다양한 관점에서의 연구가 기대된다. 즉 나노유체는 먼저 나노입자의 선정-나노 유체의 제조-부유성 및 분산성 실험-물리 화학적 물성치 분석-기초적인 열전달 물성치 연구-대류 열전달 특성 실험-기계장치에의 응용등의 순서로 이루어져야 할 것이다. 이 모든 것이 단일학문 연구가 아닌 다양한 융복합연구의 좋은 본보기가 되어 기계산업에서의 효율성 제고를 기대한다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2011-0009022)이며 이에 감사드립니다.

## References

1. Xiang-Qi Wang, 2007, "Heat transfer characteristics of nanofluids: a review", Int. J. of Thermal Sciences, Vol.46, 2007, pp.1-19
2. Handry Afrianto, N. Bayara, W. Kuerbanjiang, M. S. K Tony, H. S. Chung and H. M. Jeong, 2013, "Heat Transfer Characteristic Investigation of Nanofluids Laminar Forced Convection Using Numerical Method", Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol. 10, pp.1956 - 1962.
3. Hafizur Rehman, Md. J. Nine, Handry Afrianto, J. H. Kim, Hanshik Chung, and Hyomin Jeong, 2013, "Experimental And Numerical Analysis of Convective Heat Transfer of Alumina Nanofluids Under Laminar Flow Regime", Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, Vol. 10, pp.2305 - 2311
4. M. Nuim Labib, Md. J. Nine, Handry Afrianto, Hanshik Chung, Hyomin Jeong, 2013, "Numerical investigation on effect of base fluids and hybrid

- nanofluid in forced convective heat transfer", International Journal of Thermal Sciences 71(2013) pp.163-171
5. Kuerbanjiang Wusiman, Hyomin Jeong, Kelimu Tulugan, Handry Afrianto, Hanshik Chung, 2013, "Thermal performance of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) in aqueous suspensions with surfactants SDBS and SDS", International Communications in Heat and Mass Transfer 41(2013), pp.28-33
  6. B. Munkhbayar, Md. J. Nine, Jinseong Jeoun, Myoungkuk Ji, Hyomin Jeong, Hanshik Chung, 2013, "Synthesis of a graphene-tungsten composite with improved dispersibility of graphene in an ethanol solution and its use as a counter electrode for dye-sensitised solar cells", Journal of Power Sources 230(2013), pp. 207-217.
  7. B. Munkhbayara, Seunghwa Hwang, Junhyo Kim, Kangyoul Bae, Myoungkuk Ji, Hanshik Chung, Hyomin Jeong, 2012, "Photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells with various MWCNT counter electrode structures produced by different coating methods", Electrochimica Acta, 80, pp.100-107
  8. Hafizur Rehman, Hyomin Jeong, W. Kuerbajiang, Jun Hyo Kim, and Hanshik Chung, 2012, "Dispersion Optimization and Thermal Conductivity Measurement of Low Concentration Alumina Nanofluids", Nanoscience and Nanotechnology Letters Vol. 4, pp.676-680
  9. Md. J. Nine, Munkhbayar Batmunkh, Jun-Hyo Kim, Han-Shik Chung and Hyo-Min Jeong, 2012, "Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MWCNTs Hybrid Dispersion in Water and Their Thermal Characterization", Journal of Nanoscience and Nanotechnology. Vol. 12, pp.4553 - 4559