

1%미만의 부피비를 가지는 알루미나 나노유체의 유효 열전도도

이병호[†] · 김준호^{*} · 공유찬^{*} · 장석필^{**} · 구자예^{**}

Effective Thermal Conductivities Al₂O₃ Nanoparticles Suspended in Water with Low Concentration

Byeong Ho Lee[†], Jun Ho Kim^{*}, Yu Chan Kong^{*}, Seok Pil Jang^{**} and Ja-Ye Koo^{**}

Key Words : Al₂O₃-Nanofluids(알루미나-물 나노유체), Effective Thermal Conductivity(유효 열전도도), Transient Hot Wire Method(비정상 열선법), Zeta Potential(제타포텐셜)

Abstract

In this paper, effective thermal conductivities of water-based Al₂O₃-nanofluids with low concentration from 0.01 vol. % to 0.3 vol. % are experimentally obtained by transient hot wire method (THWM). The water-based Al₂O₃-nanofluids are manufactured by two-step method which is widely used. To examine suspension and dispersion characteristics of the water-based Al₂O₃-nanofluids, Zeta potential as well as transmission electron micrograph (TEM) is observed. We confirm the manufactured Al₂O₃-nanofluids have good suspension and dispersion. The effective thermal conductivities of the water-based Al₂O₃-nanofluids with low concentration are enhanced up to 1.64% compared with that of DI water at 21 °C. In addition, experimental results are compared with theoretical results from Jang and Choi model.

기호설명

K : 열전도도[W/m·K]
 R : 전기저항 [Ω]
 t : 시간 [sec]
 T : 온도[K]

하첨자

eff : 나노유체
 w : 백금선

1. 서론

최근 산업계에서는 전자 제품의 소형화 및 전자 부품의 고집적화에 따른 단위 면적당 발열량의 증가로 인하여 전자 제품의 냉각에 대한 관심이 고조되고 있다. 그 뿐만 아니라 대형 발전 시스템의 열교환기나 열관리 시스템의 효율 극대화와 차세대 냉매 제작에도 관심의 초점이 맞춰지고 있다.

현재까지의 열전달에 의한 냉각은 냉매의 물성치와 냉각 장치의 형상 설계에 의존하여 왔으며, 열을 효율적으로 전달하는 기술은 냉각 유체의 특성보다는 설비 시스템의 형상 설계를 통해서 발전되어 왔다. 그러나 최근 설비 시스템의 소형화와 고집적화가 진행됨에 따라 설비 시스템 내부의 냉각 및 열전달 시스템 역시 사이즈가 점차적으로 작아지는 경향을 보이고 있는데, 이러한 경향은 설비

[†] 책임저자,비회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
E-mail : spjang@hau.ac.kr
TEL : (02)300-0112 FAX : (02)3158-2191

^{*} 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

^{**} 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

시스템 내부의 냉각 및 열전달 시스템의 형상 설계에 의한 성능 향상의 한계를 가져올 수 밖에 없다. 따라서 설비 시스템의 소형화에 따른 성능 향상을 추구하기 위해서 설비 시스템 내의 냉각 및 열전달 시스템의 형상 설계가 아닌 작동유체의 특성 향상을 통해 설비 시스템의 성능을 향상시키는 연구가 필요하다. 그래서 최근 열적 특성이 우수한 나노유체가 차세대 작동유체로 조명 받고 있다. 나노유체란 일반유체에 나노입자를 소량 첨가하여 분산(Dispersion), 부유(Suspension)시켜 제작한 유체이다. 이러한 나노유체는 기존의 수 밀리리터에서 수 마이크로미터의 크기를 가지는 입자를 첨가한 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 실험적으로 발견된 나노유체의 열적 특성 중 대표적인 내용은 일반유체의 부피에 대한 소량의 부피비를 가지는 나노입자를 일반유체에 첨가하더라도 나노유체의 열전도도가 10%정도 향상된다는 것이다. 이러한 연구결과들은 나노유체가 새로운 형태의 열 수송 유체로 대두될 것이라는 의견을 뒷받침 해주는 주된 연구 결과이다.

Fig.1 은 기존 연구자들에 의해 제시된 부피비 변화에 따른 알루미늄 (Al_2O_3) 나노유체의 열전도도 실험 데이터를 보여주는 것이다.⁽¹⁻⁶⁾ 알루미늄 나노입자는 물에 잘 분산되는 특성을 지니기 때문에 제작이 수월하며 일반적으로 많이 사용되는 나노입자이다. Fig.1 은 소량의 나노입자를 첨가한 나노유체가 일반유체에 비해 우수한 열전도도를 지니고 있음을 나타내고 있다. 최근 1% 미만의 부피비를 가지는 나노유체를 제작하는 경향이 많지만 현재까지 부피비 1%미만의 알루미늄 나노유체의 열전도도는 보고되고 있지 않다. 특히, Das et al.⁽⁷⁾은 Toluene 을 기본유체로 하여 부피비가 0.005%~0.011% 되도록 금나노입자를 첨가하여 만

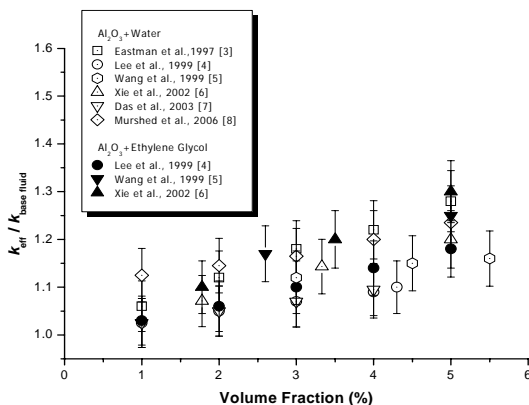


Fig.1 Experimental results for Al_2O_3 nanoparticles suspended in basefluids

든 금나노유체의 열전도도를 측정하였다. Das et al.⁽⁷⁾ 의 연구결과에 따르면 기본유체에 금나노입자를 0.005~0.011 Vol. % 첨가하였음에도 불구하고, 금나노유체의 유효 열전도도는 기본유체의 유효 열전도도에 비하여 3~14%증가하는 것으로 보고하였다.

따라서 본 논문에서는 1%미만의 부피비를 가지는 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 실험적으로 측정하고자 한다. 그 결과를 이용하여 Das et al.⁽⁷⁾이 보고한 것처럼 1%미만의 부피비에서도 유효 열전도도가 크게 상승하는지 확인하고자 한다. 마지막으로 본 실험결과와 Jang and Choi model 의 이론적 결과를 비교하고자 한다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치 및 실험 방법

나노유체는 나노입자의 부피비가 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3%가 되도록 Deionized Water(DI Water)를 기본유체를 사용하여 Al_2O_3 나노입자를 첨가하는 방식으로 제작하였고, 제작된 나노유체는 입자가 잘 분산 되도록 제작 직후 초음파 세척기에서 5~30 시간 동안 초음파에너지를 가하여 주는 2 단계 방법(2 Step Method)를 사용하였다. 알루미늄(Al_2O_3) 나노입자는 Nanotechnologies사에서 제조 되었으며 크기는 직경 $30 \pm 5nm$ 이다.

또한, 투과전자현미경(TEM)과 Malvern Instrument사의 제타포텐셜 측정장치를 이용하여 유체 내 알루미늄 나노입자의 분산, 부유 특성을 살펴보았다.

Fig.2 은 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 측정하기 위하여 사용된 실험 장치를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 나노유체의 유효 열전도도를 측정하기 위하여 비정상 열선법을 이용한 장치를 고안, 제작하였다. 비정상 열선법은 Fig.2 에서 보여 지듯이 휘스톤브리지 회로를 이용하여 일정한 전

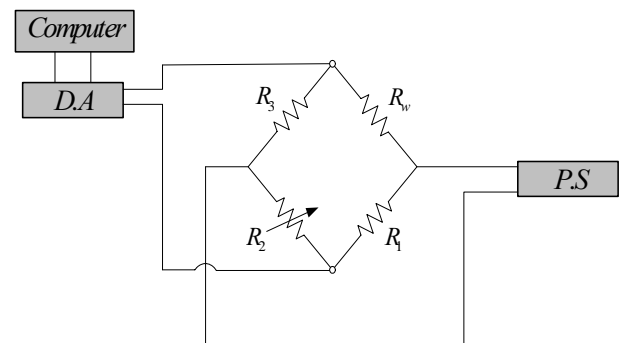


Fig.2 Schematic of a transient hot wire apparatus for measuring thermal conductivities of Al_2O_3 -nanofluids

류를 백금선에 가하게 되면 백금선 자체에 온도 변화가 발생되어 온도에 따라서 변하는 저항은 다시 백금선의 전압 변화를 발생시키게 된다. 즉, 실험 장치를 통하여 얻을 수 있는 전압 변화는 백금선의 저항-온도 관계를 이용하여 온도 변화로 표현한 뒤 최종적으로 열전도도 측정 관계식에 적용하여 열전도도를 구하는 방법이다. 이 비정상 열선법은 측정 유체 내에서 발생할 수 있는 자연대류현상을 완전히 제거할 수 있다. Fig.2의 휘스톤 브리지회로에서 R_w 은 백금선의 저항이며, R_1 은 5 k Ω 저항기, R_2 는 5k Ω 전위차계 그리고 R_3 는 5 Ω 저항기로 구성하였다. 실린더 내부에 Hot Wire로 사용된 Platinum Wire는 OMEGA사에서 제작되었으며 직경이 50.8 μm , 0 $^\circ\text{C}$ 에서 저항은 10.144 Ω 이다. 이 백금선은 구리 지지대에 납땜으로 접합되어 실린더 내부에 위치하게 되며, 길이는 210mm이다. 실린더에 사용된 재질은 Stainless Steel가 사용되었으며 이 실린더는 전해연마 가공을 하였다. 실린더의 내경은 29.4mm, 길이는 240mm 그리고 실린더 내의 체적은 150mL이다.

측정을 시작하기 전에 저항 R_2 에 위치한 전위차계(가변 저항기)를 이용하여 휘스톤 브리지회로 전체의 초기 측정 저항을 0 Ω 으로 맞추게 되며 이 휘스톤 브리지회로의 초기 저항의 오차는 최대 $\pm 0.05\Omega$ 이다. 교류전원공급기에서 회로에 공급되는 전원은 On/Off 스위치를 이용하여 개폐하였으며 이 때 사용된 교류전원공급기는 Agilent사에 제작되었으며 이 교류전원공급기에서 회로에 5V의 전원을 공급하였다. 이 공급 전원의 오차는 $\pm 0.001V$ 이다. 전원 공급기에서 공급된 전원에 의해 백금선의 저항이 변화하고 이 저항 변화에 따른 백금선의 시간에 따른 전압 변화는 Agilent사에서 제작된 Analog-to-Digital Converter(A/D)에 의하여 측정되었다. Analog-to-Digital Converter(A/D)의 Resolution은 3 μV 이며, Sampling Rate는 초당 25번이다. 본 실험은 백금선이 외부 온도의 영향에 따른 저항 변화를 최소화하기 위하여, 측정은 상시 21 $^\circ\text{C}$ 을 유지하는 인큐베이터에서 실시하였으며 인큐베이터 내의 온도는 OMEGA사에 제작된 T-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 인큐베이터 내의 온도 오차는 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 이다.

2.2 실험 장치 검증 실험

실험 장치의 정확성을 검증하기 위하여, 물성치가 잘 알려진 물을 이용하여 유효 열전도도를 측정해 보았다. 열원 주위의 액체는 등방성이고, 그 분포 범위가 무한대이며 국부적으로 열역학적 평형 상태에 있다고 가정하였다. 또한, 밀도는 높고

일정한 압력으로 유지되었다. 따라서 백금선에서 발생된 열은 일차원 전도에 의해서만 전달되며 복사나 대류에 의한 열전달은 존재하지 않는다고 볼 수 있으며 식 (1)은 백금선의 저항과 온도 상관식을 나타낸 것이다.

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta R_{w2} - \Delta R_{w1}}{R_0} \quad (1)$$

여기서, R_0 는 0 $^\circ\text{C}$ 의 백금선 저항이며, α 는 백금선의 Resistance Temperature Coefficient이다. 이 값은 각각 R_0 는 10.144 Ω 이며 α 는 0.0039092/ $^\circ\text{C}$ ⁽⁸⁾이다.

본 실험에서 사용된 Transient Hot Wire 장치를 이용하여 21 $^\circ\text{C} \pm 0.4^\circ\text{C}$ 에서 측정한 물의 열전도도를 측정한 결과, Reference Data⁽⁹⁾와의 오차가 1% 이내로 잘 일치하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 부피비 0.1%의 알루미나 나노유체의 분산, 부유 특성과 부피비 0.01~0.3%를 가지는 알루미나 나노유체의 유효 열전도도를 비정상 열선법을 이용하여 실험적으로 측정해 보았다.

Fig.3은 초음파에너지 적용시간에 따른 부피비 0.1%를 가지는 알루미나 나노유체의 제타포텐셜 측정결과이다. 초음파에너지를 적용하지 않은 부피비 0.1%의 알루미나 나노유체의 제타포텐셜은 23mV로 측정되었으며, 부피비 0.1%의 알루미나 나노유체에 포함된 알루미나 입자를 초음파 에너지로 5시간 이상 가해주었을 경우 제타포텐셜이 30mV 이상인 것으로 측정되었다. 제타포텐셜이 30mV 이상인 경우 유체에 포함된 입자의 분산, 부유 특성은 안정되며, 60mV 이상인 경우, 아주 안정적인 것으로 알려져 있다. 하지만 20mV 이하인

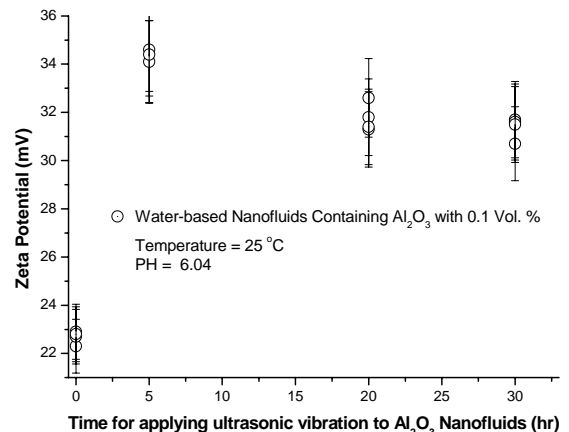


Fig.3 Zeta potential of Al₂O₃-nanofluids according to time for applying ultrasonic vibration

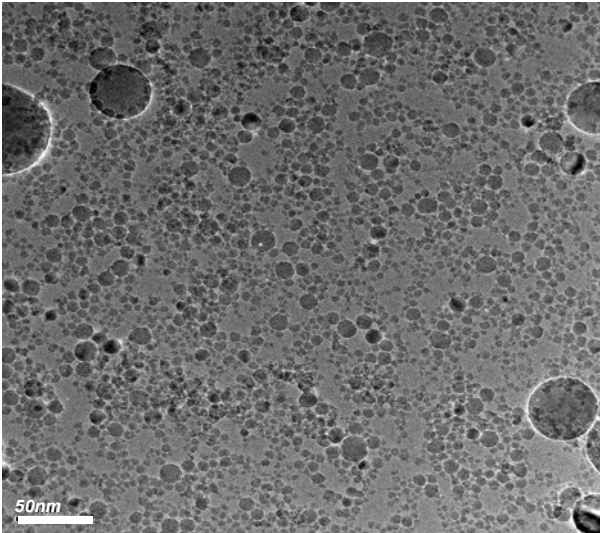


Fig.4 Transmission electron micrograph of Al₂O₃-nanofluids

경우, 다소 불안정적이며 5mV 이하인 경우 나노입자들이 안정적으로 분산, 부유되지 못하고 서로 응집되는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서 본 연구를 위해 제작된 나노유체에 포함된 알루미늄 나노입자의 분산, 부유 특성이 안정되어 있는 것으로 사료된다. 또한 Fig.4 를 통하여 나노유체에 포함된 알루미늄 나노입자가 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 측정하기 위하여 본 연구에서는 비정상 열선법을 이용하였다. 식(2)는 비정상 열선법에서 사용되는 열전도도 측정 상관식을 나타낸 것이다.

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

여기서, q 는 백금선에 가해지는 단위 길이당 열

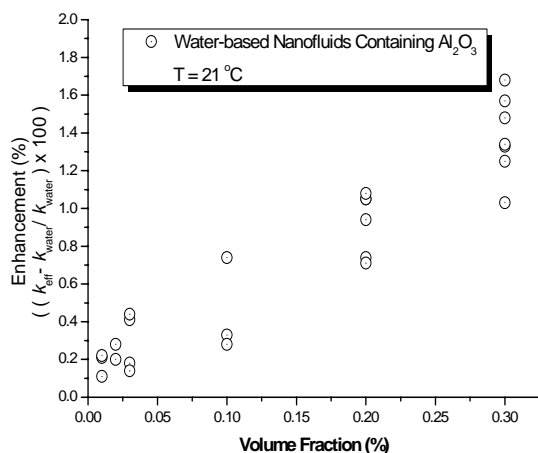


Fig.5 Effective thermal conductivities of Al₂O₃-nano fluids with low concentration from 0.01 vol. % to 0.3 vol. %

량, $T_2 - T_1$ 는 시간 t_1 과 t_2 사이의 백금선 온도 변화를 나타낸다. 또한, 식(3) 은 1%미만의 부피비를 가지는 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도 측정치의 물의 열전도도에 대한 퍼센트 향상율을 나타내는 식이다.

$$\left(\frac{k_{eff} - k_{water}}{k_{water}}\right) \times 100 \quad (3)$$

여기서, k_{eff} 는 나노유체의 유효 열전도도, k_{water} 는 물의 유효 열전도도를 나타낸다. Fig.5 은 비정상 열선법을 이용하여 1%미만의 부피비를 가지는 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 측정한 결과이다. 본 실험에서 사용된 알루미늄 나노유체는 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3%의 부피비를 가지며, 물의 유효 열전도도에 대한 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도 최대 향상율은 부피비 0.3%, 21 °C에서 1.64%이며, 각각의 부피비에서 평균 유효 열전도도 향상율은 0.18%, 0.23%, 0.29%, 0.40%, 0.93%, 1.38%이다. 알루미늄 나노유체의 부피비가 증가할수록 유효 열전도도가 완만하게 증가하는 것으로 확인되었다. 이 실험 결과의 경향성은 부피비 0.005%~ 0.011%를 가지는 Toluene + Au 나노유체의 유효 열전도도가 부피비에 따라 급격하게 증가하는 것으로 나타난 Das et al⁽⁷⁾의 실험 결과 경향성과 일치하지 않는다.

나노유체의 유효 열전도도를 예측하기 위한 이론적 모델인 Jang and Choi 모델⁽¹¹⁾ 를 이용하여 도출된 이론적 결과와 비정상 열선법을 이용하여 실험적으로 측정한 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 비교하여 보았다.

Jang and Choi 모델⁽¹¹⁾ 은 나노유체의 유효 열전도도를 다음과 같이 표현하고 있다.

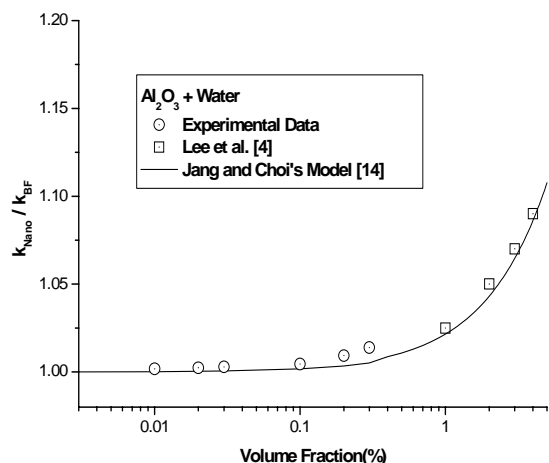


Fig.6 Comparing Experimental results with Jang and Choi mode

$$k_{eff} = k_{BF}(1-f) + \beta k_{particle} f + C_1 \frac{d_{BF}}{d_{nano}} k_{BF} Re_{d_{nano}}^2 Pr f \quad (4)$$

여기서, k_{BF} 는 기본유체의 유효 열전도도, $k_{particle}$ 은 나노입자의 열전도도, β 는 단위 면적당 kapitza resistance와 관련된 상수, f 는 나노입자의 체적 비율, C_1 은 비례상수(18×10^{16}), d_{BF} 와 d_{nano} 는 각각 기본유체의 분자 직경, 나노입자의 직경, Re 는 Reynolds number, Pr 은 Prandtl number을 나타낸다. 식(4)에서 오른쪽 첫 번째 항은 기본유체의 열전도도를 나타내며, 두 번째 항은 나노입자의 열전도도, 세 번째 항은 유체 속에 분산, 부유된 나노입자의 브라운 운동에 기인한 나노유체의 열전도도의 향상을 나타내는 항이다. Fig.6은 Jang and Choi 모델과 실험적으로 측정된 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 비교한 결과이다. Fig.6에서 보여지듯이, 부피비 1% 이상을 가진 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 실험적으로 측정된 Lee et al(4)의 결과와 부피비 1%미만을 가지는 알루미늄 나노유체의 측정치가 Jang and Choi 모델과 1% 이내로 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 비정상 열선법을 이용하여 실험적으로 측정된 부피비 1% 미만을 가지는 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도가 유효함을 입증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 기본유체에 대한 나노입자의 부피비가 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3%가 되도록 제작된 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도를 비정상 열선법을 이용하여 실험적으로 측정하였으며, 부피비 0.1%를 가지는 알루미늄 나노유체의 제타포텐셜을 측정하여 유체에 포함된 나노입자의 분산, 부유 특성을 살펴 보았다.

물의 유효 열전도도에 대한 알루미늄 나노유체의 유효 열전도도 최대 향상율은 부피비 0.3%, 21°C에서 1.64%로 측정되었으며, 알루미늄 나노유체의 부피비에 따른 유효 열전도도 향상율은 Das et al⁽⁷⁾의 실험 결과 경향성과 잘 일치하지 않았다. 그리고 나노유체의 유효 열전도도를 예측하기 위한 이론적 모델인 Jang and Choi 모델⁽¹¹⁾의 이론적 결과와 본 연구의 실험적 측정 결과가 1% 이내로 잘 일치하였다.

또한, 부피비 0.1%를 가지는 알루미늄 나노유체의 초음파 적용 시간에 따른 제타포텐셜 측정 결과, 유체 속에 포함된 알루미늄 나노입자의 분산, 부유 특성은 초음파에너지를 5시간 이상 적용 한 경우에 초음파에너지를 적용하지 않은 알루미늄

입자에 비하여 분산, 부유 특성이 우수한 것으로 나타났다.

5. 후 기

본 논문은 2006년 한국학술진흥재단의 지원 과제인 신진 연구과제(KRF-2006-331-D00051)의 지원에 의하여 연구된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., and Thompson, L.J., 1997, "Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids," *Proc. Symp. Nanophase and Nanocomposite Mater. II*, vol. 457, pp. 2-11.
- (2) Lee, S., Choi, S.U.S., and Eastman, J.A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 121, pp. 280-289.
- (3) Wang, X., Xu, X., and Choi, S.U.S., 1999, "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 13, pp. 474-480.
- (4) Xie, H.Q., Wang, J.C., Xi, T.G., Liu, Y., Ai, F., and Wu, Q.R., 2002, "Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, pp. 4568-4572.
- (5) Das, S.K., Putra, N., 2003, Thiesen, P., Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *ASME Trans. J. Heat Transfer*, vol. 125, pp. 567-574.
- (6) Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., 2006, "Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspensions (Nanofluids)," 2006 IEEE Emerging Technologies-Nanoelectronic Conference.
- (7) Patel H.E., Das S.K., Sundararajan T., Nair A.S., George B., and Pradeep T., 2003, "Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effect," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 2931-2933.
- (8) Bentley J.P., 1984, "Temperature Sensor Characteristics and Measurement System Design." *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 17, pp. 430-439.
- (9) Incropera, F. P. and Dewitt D. P., 2002, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 5th Ed., WILEY.
- (10) Müller R.H., 1996, "Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis, 1st Ed., Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- (11) Seok Pil Jang and Stephen U.S. Choi, 2004, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", *Applied Physics Letters*, vol.84, pp.4316-4318.