

다이아몬드 나노분말을 적용한 상용 열교환 유체의 열전도도 특성

손권¹ · 이정석² · 박태희³ · 박권하[†]

(원고접수일 : 2013년 7월 19일, 원고수정일: 2013년 8월 30일, 심사완료일 : 2013년 9월 24일)

Thermal conductivity characteristics of commercial heat exchange fluids applying diamond nano-powder

Kwun Son¹ · Jung-Seok Lee² · Tae-hee Park³ · Kweon-Ha Park[†]

요약: 기본유체에 나노분말을 분산시킨 나노유체는 기본유체보다 높은 열전도도를 보인다. 이러한 특성으로 인해, 에너지 효율을 향상시키기 위한 대안으로서 나노유체가 주목받고 있으며, 고효율을 필요로 하는 열교환기의 작동유체로 적용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 상용 열교환기의 작동유체로서 많이 사용되고 있는 증류수, 에틸렌글리콜, 에틸알코올에 나노다이아몬드 분말을 적용한 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 나노유체는 매트릭스 합성 분산법을 이용하여 제조하였으며, 나노다이아몬드의 혼합량은 0.1, 0.3, 0.5, 1vol%로 하였다. 측정결과 모든 기본유체 조건에서 나노유체의 열전도도가 증가하였으며, 특히 증류수에 분산된 1vol%의 나노유체에서 23%의 높은 열전도도 향상 경향을 보였다.

주제어: 다이아몬드 나노유체, 열전달계수, 매트릭스합성 분산법

Abstract: Nanofluids, suspending nano-particles of various materials, have a good heat transfer characteristics compared with pure base fluids. For the reason, nanofluids have been considered as one of the measure to improve energy efficiency, and studied to apply on a working fluid of a high performance heat exchanger. This study tested thermal conductivities of nanofluids applying diamond nano-powder on DI water, ethylene glycol, and ethyl alcohol. Nanofluids are fabricated by matrix synthetic method, and the volume percent of diamond nano-powder contained in the base fluid are 0.1, 0.3, 0.5, and 1vol%. As a result, thermal conductivities are enhanced with applying diamond nano-power. Especially, the conductivity is highly increased up to 23% at 1vol% nanofluid applying diamond nano-powder on DI water.

Keywords: Diamond nanofluid, Working fluid, Thermal conductivity, Matrix synthetic method

1. 서론

100nm크기 이하의 나노분말을 분산시킨 유체의 열전도도 향상 경향은 1995년 최[1]에 의해 보고되었으며, 이러한 유체를 나노유체라 명명하였다. 기

본유체와 비교하여 열전도도가 월등한 고체 나노분말을 이용하여 나노유체를 제조할 경우, 기본유체 대비 열전도도가 크게 증가하여 열전달 성능이 향상되는 특성을 나타낸다. 나노유체의 이러한 특성

[†]Corresponding Author: Division of Mechanical & Energy Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: Khpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367

1 Department of Mechanical Engineering, Korea Marine and Ocean University, E-mail: realsonkwun@naver.com, Tel: 051-410-4953

2 Neoenbiz, Co, E-mail:jslee@neoenbiz.com, Tel: 032-684-9749

3 Neoenbiz, Co, E-mail:nanodiamond@neomond.com, Tel: 032-684-9749

은 현대의 과도한 에너지 소비와 그에 따른 에너지 부족 현상의 한 대책으로써 주목할 만하다[2].

Al₂O₃, Cu, CuO 등 다양한 나노분말을 증류수, 에틸렌 글리콜 등의 기본유체에 분산한 나노유체의 열전도도 향상 연구의 경우, 이미 많은 선행연구들이 진행되었는데 나노입자의 부피비, 나노유체의 온도가 높을수록 열전도도 향상폭이 커지는 경향을 보였다. 또한 나노분말 자체의 열전도도가 높을수록 더 높은 열전도도 향상 경향을 나타냈다 [3]-[7].

동일한 기본유체에 탄소나노튜브와 같이 높은 열전도도와 더불어, 길쭉한 형태에 의한 넓은 접촉 면을 가지는 나노분말을 사용한 나노유체의 경우, 분말 그 자체의 높은 열전도도에 의한 열전도도 상승 경향 뿐 아니라, 길쭉한 형태의 장점에 기인하는 추가적인 열전도도 상승 경향도 있음이 보고되었다[8]-[10].

이와 같이, 소량의 나노분말만을 분산하여도 열전달 성능이 크게 향상되는 나노유체의 특성을 활용하기 위해 전기, 운송, 산업, 환경, 원자력 등의 다양한 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있고, 특히 열교환기의 효율향상을 위한 작동유체로서의 나노유체 적용 연구가 활발히 이루어지고 있다 [11]-[16].

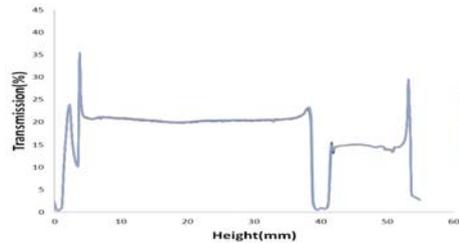
최근에는, 앞서 사용된 나노분말들에 비해 월등히 뛰어난 열물성을 가지고 있고, 분산안정성에 유리한 낮은 밀도를 가진 최적의 나노유체 제작용 나노분말로 판단되어지는 나노다이아몬드 분말을 이용한 연구가 수행되어지고 있으나, 다양한 상용 열교환 유체들에 적용된 나노다이아몬드 첨가 나노유체의 열전도도 특성 분석은 아직 부족한 실정이다[17]-[20].

따라서, 본 연구에서는 열교환 유체로서 많이 사용되고 있는 증류수, 에틸렌 글리콜, 에틸알콜에 나노다이아몬드 분말을 각각 0.1, 0.3, 0.5, 1vol% 분산하여 제조된 나노유체의 열전도도를 상온(24°C)에서 실험적으로 측정하여 나노다이아몬드 분말 첨가 나노유체의 열교환 유체로서의 적합성을 알아보고자 한다.

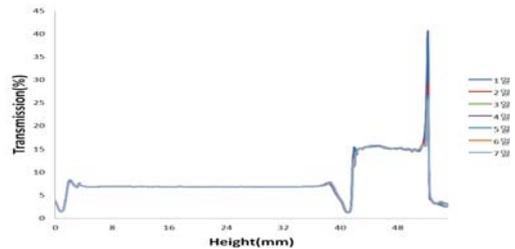
2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 나노유체 제조 및 분산 안정도

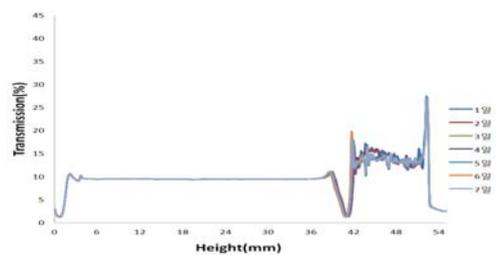
Figure 1 (a), (b), (c)는 나노입자들의 분산 후 침전현상이 발생하지 않고, 고른 분산도를 보이며, 가격이 저렴하여 대량생산이 가능한 매트릭스 합성법을 이용하여 증류수, 에틸렌 글리콜, 에틸알콜의 기본유체에 평균직경 38nm의 나노분말을 분산하여 제조한 나노유체의 분산안정성을 측정된 그래프이다. 투명한 병에 담겨있는 나노유체를 일정 시간간격을 두고 스캔하여 빛의 산란 패턴을 기록함으로써 분산안정성을 측정하는 Formulacion사의 Turbiscan을 이용하여 측정하였고, 7일 이상 응집 및 침전현상이 관찰되지 않았다.



(a) DI water-based diamond nanofluid



(b) Ethylene glycol-based diamond nanofluid



(c) Ethyl alcohol-based diamond nanofluid

Figure 1: Stability of nanofluids

2.2 실험장치 구성

Figure 2은 본 실험에서 나노유체의 열전도도 측정을 위해 사용된 비정상열선법 장치의 개략도이다.

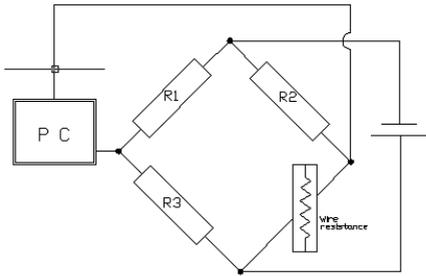


Figure 2: Schematic of experimental system

비정상열선법이란 휘스톤 브릿지 회로를 이용하여 유체의 열전도도를 측정하는 방법으로써, 장치 구성이 쉽고, 측정시간이 짧으며, 대류에 의한 영향을 제거할 수 있는 장점을 가진다. 회로 내의 직류 전원공급장치는 EZ사의 GP-4303TP를 이용하였고, 4V의 전압을 on/off제어으로써 회로에 공급하였다. 회로 양단간의 전압차는 National Instrument 사의 NI USB-6215를 이용하여 측정하였고, 회로 전체에 걸리는 전압과 함께 측정되었다. 열선은 Nilaco사의 50 μm 직경 백금선을 사용하였고, 총 길이는 0.1m이다. 초기 백금선의 저항은 TK-3204로 측정되었고, 고정저항은 온도저항계수의 영향에 의한 오차를 줄이기 위해 15Ω 메탈필름 저항을 사용하였다.

2.3 실험이론 및 방법

다이아몬드 분말이 첨가된 나노유체에 열선이 잠겨진 상태로 전류가 흐르게 된다면, 열전도도가 상대적으로 낮은 유체 속에 잠겨져 있는 경우보다 활발한 열전달의 영향으로 열선의 온도는 덜 상승할 것이다. 이러한 열선의 저항과 온도의 상관관계를 식으로 표현하면 다음과 같다[20].

$$k = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{L} \frac{1}{S} \quad (1)$$

$$s = \left(\frac{T_w(t_2) - T_w(t_1)}{\ln(t_2) - \ln(t_1)} \right) \quad (2)$$

휘스톤브릿지를 이용하여 측정된 전압차는, 다음 식의 저항과 온도 관계를 통해 열선의 온도변화로 계산된다.

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \quad (3)$$

여기서 R_0 는 0°C에서 열선의 저항, α 는 백금선의 온도저항계수로서 백금선의 경우 0.0039092/°C이다 [21][22].

2.4 장치 신뢰성 검증

Figure 3는 장치 신뢰성 검증을 위해 26°C 조건에서 증류수의 열전도도를 비정상열선법으로 측정 한 결과를 나타낸다. 5회에 걸쳐 같은 방법으로 측정하였고, 측정결과 이론값과 평균 1% 이내의 오차를 보였다[23].

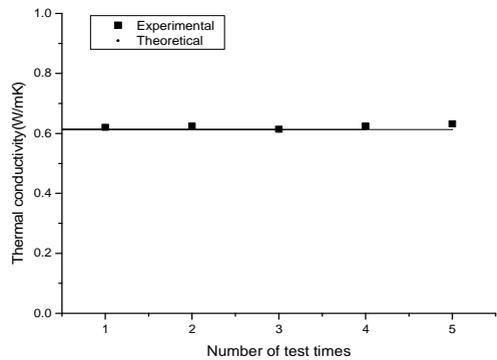


Figure 3: Comparison of thermal conductivities between theoretical and experimental data of DI water

Figure 4는 실험과정에서 가해지는 반복되는 가열과정이 나노유체의 열전도도에 미치는 영향을 평가하기 위해 충분한 시간간격을 두고 열전도도를 측정 한 그래프이다. 증류수에 1vol%로 분산된 나노유체의 열전도도 측정결과 시간이 증가함에 따른 열전도도의 변화를 거의 관찰할 수 없었다.

위의 결과를 바탕으로, 본 실험장치는 충분한 신뢰성을 가진다고 사료된다.

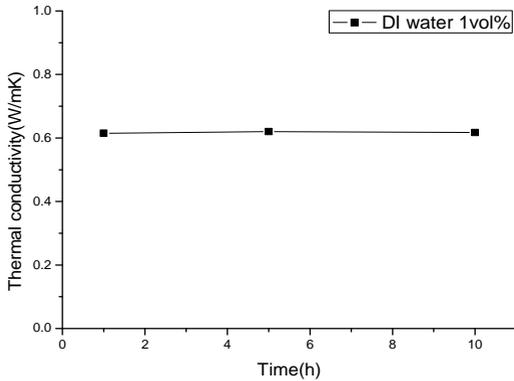


Figure 4: Thermal conductivity variations with measuring time

3. 실험결과 및 고찰

3.1 다이아몬드 나노유체의 열전도도 특성

Figure 5와 Figure 6, Figure 7은 24°C 조건에서 증류수, 에틸렌 글리콜, 에틸알콜에 나노다이아몬드 분말을 각각 0.1, 0.3, 0.5, 1vol%로 분산한 나노유체의 열전도도 특성을 나타내는데, 모든 실험조건에서 각각 5회 실험을 반복하여 얻어진 나노유체의 열전도도를 각각의 기본유체 열전도도 값과 비교하였다.

모든 실험조건에서 기본유체 대비 열전도도가 증가하였는데 그 경향은 나노다이아몬드 분말의 vol%가 증가할수록 더욱 두드러졌다. 특히 증류수를 기본유체로 한 1vol%의 다이아몬드 나노유체는 최대 20%가 넘는 높은 열전도도 향상폭을 보였는데, 이러한 경향은 알루미늄 나노분말과 같은 상대적으로 열물성이 떨어지는 분말을 이용한 결과들보다 높은 향상 결과를 나타낸다[12]. 분말 자체의 열전도도가 높을수록 나노유체의 열전도도 향상폭이 커지는 선행연구들의 결과와도 잘 일치한다.

Figure 8은 24°C 조건에서 증류수, 에틸렌 글리콜, 에틸알콜에 나노다이아몬드 분말을 각각 0.1, 0.3, 0.5, 1vol%로 분산한 나노유체의 열전도도 향상폭을 비교한 그래프이다. 나노다이아몬드분말 첨가에 따라 모든 실험조건에서 기본유체 대비 열전도도 상승 경향을 보였는데, 증류수에 분산한 나노유체의 경우 0.1, 0.3, 0.5, 1vol%일 때 기본유체

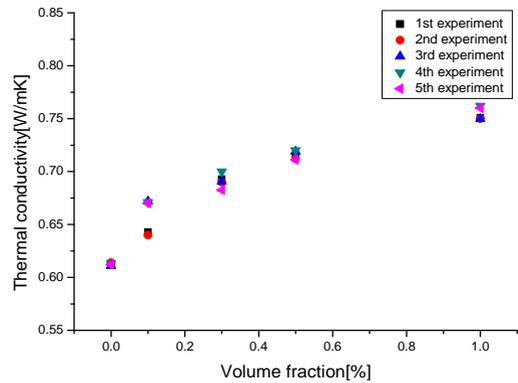


Figure 5: Thermal conductivity of DI water based diamond nanofluids

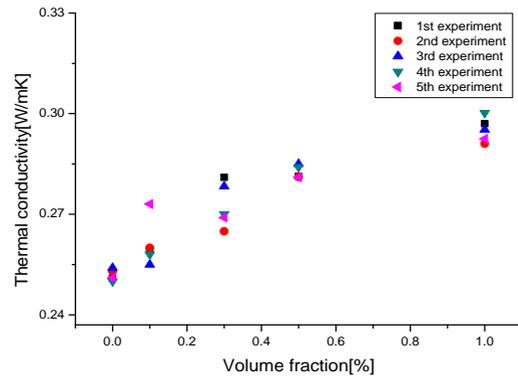


Figure 6: Thermal conductivity of ethylene glycol based diamond nanofluids

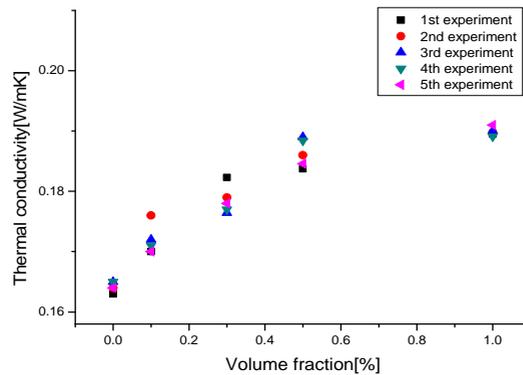


Figure 7: Thermal conductivity of ethyl alcohol based diamond nanofluids

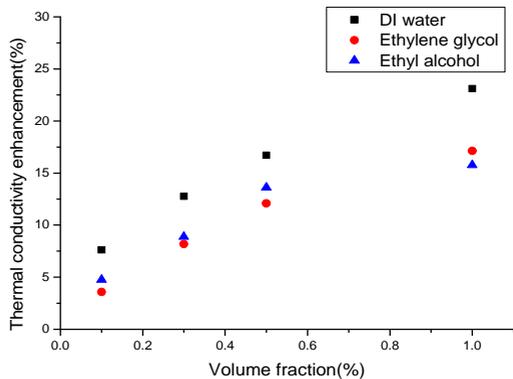


Figure 8: Thermal conductivity enhancements for DI water, ethylene glycol, ethyl alcohol based diamond nanofluids

대비 각각 7%, 12.7%, 16.7%, 23%, 에틸렌 글리콜에 분산한 나노유체의 경우 각각 3.5%, 8.1%, 12%, 17%, 에틸 알콜에 분산한 나노유체의 경우 각각 4.7%, 8.8%, 13.6%, 15.7%의 열전도도 향상폭을 보였다. 에틸렌 글리콜, 에틸 알콜에 분산한 나노유체의 경우, 향상폭이 거의 유사한 경향을 보였지만, 증류수에 분산한 나노유체의 경우 상대적으로 큰 열전도도 향상 경향을 보였는데, 이는 높은 열전도도를 가진 나노분말을 첨가한 경우와 유사한 결과로서, 증류수의 높은 열전도도에 기인한 결과로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 증류수, 에틸렌글리콜, 에틸알콜을 기본유체로 매트릭스합성 분산법에 의해 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%, 1vol%로 제조된 다이아몬드 나노유체의 열전도도 특성을 24℃ 조건에서 실험적으로 연구하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1) 증류수를 이용하여 장치신뢰성 검정을 수행하여, 평균 1%이내의 신뢰성을 확인하였고, 증류수에 분산된 1vol%의 나노유체를 이용하여, 반복된 실험 이후에도 나노유체의 열전도도가 변하지 않음을 확인하였다.

2) 모든 실험조건에서 나노유체의 열전도도 향상 경향을 보였고, 특히 증류수에 분산된 1vol%의 나노유체의 경우 23%의 높은 열전도도 향상 경향

을 보였다.

3) 에틸렌글리콜, 에틸알콜에 분산된 나노유체의 열전도도 향상폭은 유사한 반면, 증류수에 분산된 나노유체의 열전도도 향상폭은 0.1vol%, 0.3vol%, 0.5vol%, 1vol%조건에서 각각 7%, 12.7%, 16.7%, 23%로 컸는데, 이는 상대적으로 높은 기본유체의 열전도도에 기인한 것이다.

4) 열전달성능이 매우 향상된 나노다이아몬드 첨가 나노유체는 고성능을 요구하는 열교환기의 작동유체로 적합할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 소관 미래해양산업기술개발사업(2012)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S.U.S. Choi, J. A Esterman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles." Proceedings of International mechanical engineering congress and exposition, San Francisco, OSTI ID: 196525, 1995.
- [1] R. Taylor, S. Coulombe, T. Otanicar, P. Phelan, A. Gunawan, W. Lu, G. Rosengarten, R. Prasher, and H. Tyagi, "Critical review of the novel applications and uses of nanofluids," Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers MNHMT2012-75189, pp. 219-234, 2012.
- [2] S. Lee, S. U. S Choi, S. Li, and J. A Esterman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," Journal of Heat Transfer, vol. 121, pp. 280-289, 1999.
- [3] K. H. Park, J. A. Lee, and H. M Kim, "Heat conductivity test and conduction mechanism of nanofluid," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 6, pp. 862-868, 2008 (in Korean).
- [4] I. C. Bang and S. H. Chang, "Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nanofluids from plain surface in a

- pool,” *Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 48, pp. 2470-2419, 2005.
- [5] M. P. Beck, Y. Yuan, P. Warriar, and A. S. Teja, “The thermal conductivity of alumina nanofluids in water, ethylene glycole, and ethylene glycole + water mixtures,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 12, pp. 1469-1477, 2010.
- [6] V. Sridhara, and L. N. Satapathy, “Al₂O₃-based nanofluids : a review,” *Journal of Nanoscale Research Letters*, vol. 6, no. 456, pp. 1-16, 2011.
- [7] S. U. S Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood, and E. A. Grulke, “Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions,” *Applied Physical Letters* 79 pp. 2252-2254, 2001.
- [8] M. S. Liu, M. Ching-Cheng Lin, I. T. Huang, and C. C. Wang, “Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids,” *International Communications in Heat Transfer*, vol. 32, no. 9, pp. 1202-1210, 2005.
- [9] Y. Yang, E. A. Grulke, Z. G. Zhang, and G. Wu, “Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersion,” *Journal of Applied Physics*, vol. 99, p. 8, 2006.
- [10] S. P. Jang and S. U. S. Choi, “Colling performance of a microchannel heat sink with nanofluids,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 17-18, pp. 2457-2463, 2006.
- [11] H. Shokouhmand, M. Ghazvini, and J. Shabaniyan, “Performance analysis of using nanofluids in microchannel heat sink in different flow regimes and its simulation using artificial neural network,” *Proceedings of the WCE’08*, pp. 1841-1846, 2008.
- [12] P. Naphon, P. Assadamongkol, and T. Borirak, “Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 10, pp. 1316-1319, 2008.
- [13] Tim Richter, *Advanced Hybrid Propulsion and Energy Management System for Mine Haul Trucks, Heavy Vehicle Systems Optimization Merit Review and Peer Evaluation, Annual Report, Argonne National Laboratory*, pp. 46, 2006.
- [14] I. C. Nelson, D. Banerjee, and R. Ponnappan, “Flow loop experiments using polyalphaolefin nanofluids,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 23, no. 4, pp. 752-761, 2009.
- [15] J. Bongiorno, L. W. Hu, S. J. Kim, R. Hannink, B. Troung, and E. Forrest, “Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors : an evaluation of the potential features issues, and research gaps,” *Nuclear Technology*, vol. 162, no. 1, pp. 80-91, 2008.
- [16] S. V. Kidalov and F. M. Shakhov, “Thermal conductivity of diamond composites,” *Journal of Materials*, vol. 2, pp. 2467-2495, 2009.
- [17] S. Torii and W. J. Yang, “Heat transfer augmentation of aqueous suspensions of nanodiamonds in turbulent pipe flow,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 131, pp. 14-18, 2009.
- [18] M. Yeganeh, N. Shahtahmasebi, A. Kompany, E. K. Goharshadi, A. Youssefi, and L. Siller, “Volume fraction and temperture cariations of the effective thermal conductivity of nanodiamond fluids in deionied water,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 3186-3192, 2010.
- [19] W. Yu, H. Xie, Y. Li, L. Chen, and Q. Wang, “Experimental investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol based nanofluids containing low volume concentration diamond nanoparticles,” *Colloids and Surfaces A: Physicochem Aspects* 380, pp. 1-5,

2011.

- [20] H. S. Carslaw and J. C. jaeger, Conduction of Heat on Solids, 2nd Ed, Oxford University Press, 1986.
- [2] H. S. Carslaw, J. C. jaeger, 2nd Ed, Conduction of heat on solids, Oxford University Press, 1986.
- [21] Frank P. Icropera, and David P. DeWitt, Introduction to Heat Transfer 5th Eds, John Wiley & Sons, pp. 852, 2002.