

나노유체 열전도도 특성 연구

황 유진, 박재홍, 김홍석, 이재근[†]

부산대학교 기계공학과

A Study on Thermal Conductivity Characteristics of Nanofluids

Yu-jin Hwang, Jae-hong Park, Hong-suk Kim, Jae-Keun Lee[†]

ABSTRACT: Nanofluid is a kind of new engineering material consisting of nanoparticles dispersed in base fluid. Nanofluids could have various applications such as magnetic fluids, heat exchanger working fluids, lubricants, drug delivery and so on. In present study, various nanoparticles, such as MWCNT (Multi-walled Carbon Nanotube), fullerene, copper oxide, and silicon dioxide are used to produce nanofluids. As base fluids, DI-water, ethylene glycol, oil, and silicon oil are used. To investigate the thermo-physical properties of nanofluids, thermal conductivity and kinematic viscosity are measured. Stability estimation of nanofluid is conducted with UV-vis spectrophotometer. In this study, the high pressure homogenizer is the most effective method to produce nanofluid with the prepared nanoparticle and base fluid. Excellently stable nanofluids are produced with the magnetron sputtering system. Thermal conductivity of nanofluid increases with increasing particle volume fraction except water-based fullerene nanofluid which has lower thermal conductivity than base fluid due to its lower thermal conductivity, 0.4 W/mK. The experimental results can't be predicted by Jang and Choi model.

Key words: Nanofluid(나노유체), Nanoparticle(나노입자), Thermal Conductivity(열전도도), Stability(분산 안정성)

1. 서론

유체가 가지는 높은 열전도도로 인해 나노유체 기술은 새로운 열전달 유체로서 각광을 받고 있다. 특히 마이크로크기의 입자에 비해 월등한 분산 안정성으로 인해 산업으로의 적용 가능성이 높을 것으로 예상된다. 최근의 연구에 따르면 탄소나노튜브를 물과 PAO에 분산 시키는 경우 체적분율 1%에서 각각 19.6%, 160%의 열전도도가 향상됨을 보여주고 있다.⁽²⁾ 플러렌은 탄소나노튜브와는 다른 결합구조를 가진 탄소물질로서 내마

모 물질로서 각광을 받고 있다. 이 두 가지의 탄소입자는 서로 다른 합성과정에 따른 고유한 원자결합구조로 인해 서로 다른 형상과 물성치를 가진다. 탄소나노튜브는 섬유형상이며, 플러렌은 구형의 형상을 가진다. 상온에서 두 물질의 열전도도는 각각 3000 W/mK⁽⁶⁾, 0.4 W/mK⁽⁸⁾이다.

많은 나노유체 관련 연구들이 나노유체의 분산 안정성을 향상시키는데 초점을 두고 있으며, 특히 분산 안정성을 향상시킴으로써 나노유체의 열전도도를 향상시키는 연구들이 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 나노입자의 표면 개질 혹은 기본 유체의 pH를 변화시켜 입자의 분산 안정성을 향상시키고자 하였다. 본 연구에서는 CuO, SiO₂, 다중벽 탄소나노튜브와 플러렌 입자를 사용하여 물, 에틸렌 글리콜과 Oil에 분산시켜 나노유체를 제조

[†]Corresponding author
Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-512-5236
E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

Table 1 Properties of test materials.

	MWCNT	Fullerene	CuO	SiO ₂	H ₂ O	Ethylene glycol	Oil
Specific gravity	2.6	1.6	6.32	2.22	1	1.11	0.915
Thermal conductivity (W/mK)	~ 3000	0.4	76.5	1.38	0.613	0.252	0.107
Average size	L: 10 ~ 50 μm D: 10 ~ 30 nm	~ 10 nm	33 nm	12 nm	-	-	

하였다. 나노유체의 열전도도는 일반적으로 유체의 열전도도를 측정하는 방법인 비정상 열선법을 이용하였다. 그리고 나노유체의 침전 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 UV-vis spectrum 분석을 이용하였고 얻어진 결과를 바탕으로 나노유체의 분산 안정성 특성과 열전도도 특성을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 나노입자 및 기본유체의 특성

Table 1 은 나노유체를 제조하기 위해 사용된 나노입자 및 기본유체의 물성치를 나타낸 것이다. 다중벽 탄소나노튜브와 풀러렌의 열전도도는 각각 3000 W/mK와 0.4 W/mK 이며, CuO 와 SiO₂ 물의 열전도도는 각각 76.5와 1.38이다. 기본유체로 사용된 물, 에틸렌 글리콜 및 Oil의 열전도도는 각각 0.613 W/mK, 0.252, 0.107 W/mK이다.

Fig. 1은 실험에 사용된 나노입자의 전자 현미경 사진을 나타낸다. 다중벽 탄소나노튜브는 섬유형상을 하고 있으며 평균 직경이 10~30 nm이고 평균 길이는 10~50 μm이며 사진에서 보이듯이 심하게 응집되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 사용한 풀러렌, SiO₂, CuO는 모두 구형의 형상을 하고 있으며, 평균 크기는 각각 10 nm이하, 33nm, 12 nm 이다.

2.2 나노유체 열전도도 측정

본 연구에서 나노유체를 제조하기 위하여 초음파 분산기를 사용하였으며, 2시간의 초음파 분산을 통해 나노유체를 제조하였다. 그러나 탄소입자의 경우 표면 특성이 소수성이므로 물에 분산시키기 위하여 분산 안정제로 SDS (Sodium Dodecyl Sulfate)를 사용하였다.

Fig. 2는 비정상 열선법을 이용한 나노유체 열전도도 측정장치의 개략도를 나타낸 것이다. 저점도 유체의 열전도도를 측정하기 위한 비정상 열선법은 잘 알려져 있는 방법이다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 유체 내 부유하고 있는 입자의 전기 전도도에 의한 실험오류를 방지하고자 전기 전도성 유체의 열전도도 측정에 적용 가능한 비정상 열선법을 사용하였다. 측정부 백금선의 직경은 76 μm이며 절연을 위해 17 μm의 테프론 절연막이 코팅되어 있다. 백금선을 측정 대상 유체에 잠기게 한 후 대상 유체의 온도와 평형을 이룰 때까지 유지한 후 실험을 수행하였다. Fig. 2는 비정상 열선법 회로 개략도이며, 회로에 전원이 인가되면 백금선의 저항에 의한 발열로 인해 백금선 표면의 온도를 변화시켜 백금선의 저항을 변화시키게 된다. 검류계로부터 전압을 A/D 변환 장치플 통해 20Hz의 주파수로 측정하여 저장한 후 백금선 저항의 변화를 계산한다. 백금선의 전기 저항과 온도는 선형적인 관계이며 이 선형식에 대해서는 선행연구에서 매우 잘 알려져있다.⁽¹⁾ 이러한 선형적인 관계식으로부터 구해진 온도는 비정상 구간에서 로그 시간축에 대해 선형적인 관계를 가진다. 측정된 온도 시간 관계 곡선에서 식 (1)을 이용하여 나노유체의 열전도도를 계산할 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

여기서 k는 유체의 열전도도이며, T₁, T₂는 각각 시각 t₁, t₂에서 측정된 백금선의 온도이다.

2.3 나노유체 분산 안정성 평가

최근 연구에서 나노유체의 UV-vis spectrum을 분석하여 부유하고 있는 입자에 따른 흡광도를 이용하여 나노유체의 부유 안정성을 침전 시간에

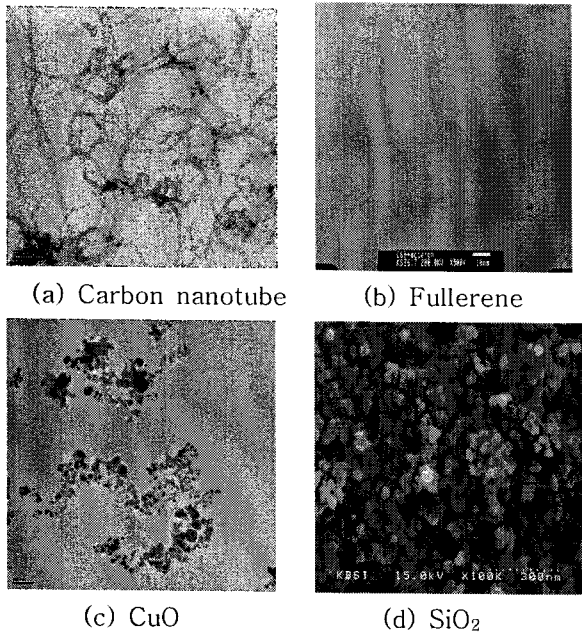


Fig. 1 Transmission electron microscope images of the test particles.

따라 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 소개되었다. Fig. 3, 4은 Oil을 기본유체로 한 나노유체의 UV-vis spectrum 분석 결과와 입자 농도에 따른 흡광도를 분석한 결과이다. 397 nm의 파장에서 최대 흡광도가 나타남을 알 수 있으며, 이 파장에서 부유하고 있는 입자의 농도와 흡광도가 선형적인 관계를 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 관계를 이용하여 Oil 및 물을 기본유체로 한 나노유체의 침전시간에 따른 부유 안정성을 평가하였다.

3 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 Oil 및 물을 기본유체로 한 나노유체의 침전 시간에 따른 UV-vis spectrum의 상대 흡광도를 나타낸 곡선이다. MWCNT의 경우 매우 빠른 침전속도를 보이고 있다. 오일에 분산된 경우 제조 후 58시간이 되었을 때, 부유하고 있는 입자의 농도가 28%로 떨어지며, 816시간이 지난 후에도 여전히 침전이 발생하는 경향성을 가짐을 알 수 있다.

반면에 플러렌의 경우 Oil내에서 매우 낮은 침전도를 지님을 알 수 있고 제조 후 686시간이 지났을 때, 6%의 침전이 발생하였으며, 이 후 더 이상 침전이 일어나지 않는 경향성을 보임을 알 수 있다. 따라서 플러렌의 경우 분산 안정성이 매우 우수한 나노유체를 제조할 수 있음을 알 수 있다.

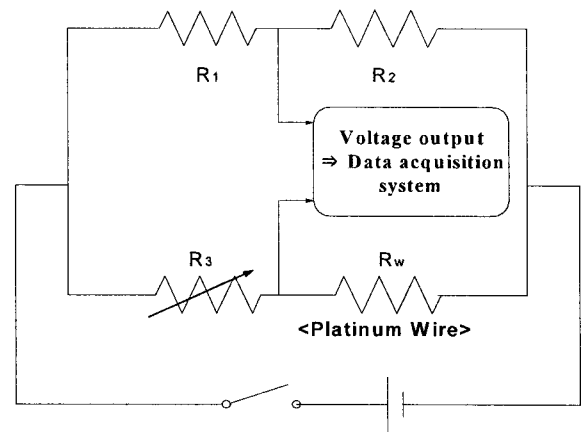


Fig. 2 Schematic diagram of transient hot wire system for thermal conductivity measurement of nanofluids.

또한 수계 나노유체에 분산제 (SDS)를 첨가한 경우 분산성이 향상되어 침전이 지연되고 있음을 알 수 있다. 이는 유체의 입자의 계면특성에 따른 적절한 분산제를 선정하여 첨가함으로써 나노유체의 분산 안정성을 향상시킬 수 있음을 나타낸다.

Fig. 6은 다양한 나노유체의 열전도도 특성을 나타내고 있다. 실험결과에서 물에 1 vol%의 입자를 분산시켰을 때 MWCNT, CuO, SiO₂의 순서로 열전도도 향상 정도가 나타나며, 이는 입자의 열전도도 크기와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 또한 동일한 입자를 물과 에틸렌 글리콜에 각각 분산하였을 때 기본유체의 열전도도가 낮은 나노유체의 열전도도 향상이 커 보다 낮은 열전도도를 지니는 유체를 이용하여 나노유체 제조를 했을 때 열전도도 향상이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 나노유체의 열전도도와 관련하여 다른 연구 결과에서도 잘 알 수 있는 경향이다.

Fig. 7과 8은 MWCNT와 플러렌의 수계, 오일계 나노유체에서 입자 체적분율에 따른 열전도도 향상을 나타낸 그래프이다. MWCNT의 경우 선행연구에서 잘 나타나 있듯이, 체적분율에 따라서 열전도도의 향상이 커짐을 알 수 있다. 반면 플러렌 나노유체의 경우 입자분율이 커짐에 따라 열전도도 감소가 커짐을 알 수 있는데, 이는 입자의 열전도도가 물의 열전도도 보다 낮음에 기인한 것으로 생각된다. 이는 Fig. 8에서 플러렌의 열전도도보다 낮은 오일에 분산된 플러렌 나노유체의 경우 열전도도가 입자분율에 따라 증가된 결과로부터 알 수 있다.

Fig. 9는 물-MWCNT 나노유체의 열전도도 실

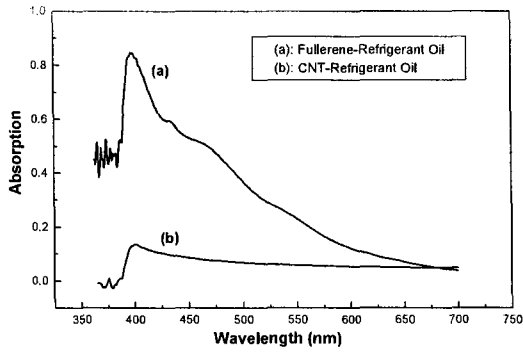


Fig. 3 UV-vis spectrum of multiwalled carbon nanotubes and fullerene in oil suspension.

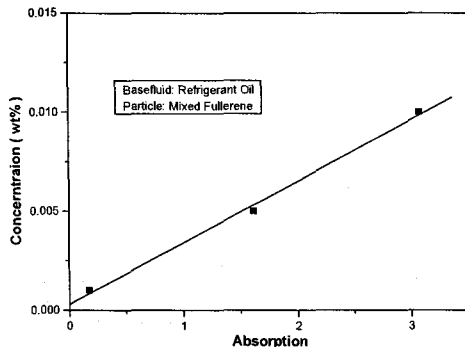


Fig. 4 The linear relation of fullerenes in oil suspension at wavelength of 397 nm.

험결과를 모델링 결과와 비교한 그래프이다. 사용된 모델은 Jang & Choi Model을 사용하였으며⁽¹³⁾, 입자의 특성 상 Brownian Motion에 의한 인자는 제외하였다. 따라서 나노유체의 열전도도 (k_{comp}) 모델은 다음 식으로 정리될 수 있다.

$$k_{comp} = \langle \cos^2 \theta \rangle \beta k_{fiber} f_{fiber} + (1 - f_{fiber}) k_f \quad (2)$$

여기서 k 와 f 는 각각 열전도도와 체적분율을 나타내며, β 는 Kapitza 저항을 나타낸다⁽¹³⁾. θ 는 열전달 방향에 대한 각 MWCNT 축이 이루는 각을 나타내며, 주어진 방향에 대한 정렬이 완전하게 이루어졌을 때 $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1$ 이 되며, 방향성이 불규칙적일 경우에는 $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1/3$ 이 된다⁽¹⁴⁾. 따라서 본 연구에서 사용된 MWCNT 나노유체의 경우 초기입자의 entanglement와 응집정도를 감안할 때 $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1/3$ 를 적용한다. 결과 그래프를 보면 $\beta=0.006$ 일 때 실험결과가 모델링 결과와 잘 맞음을 알 수 있다.

4. 결론

나노유체의 열전도도 특성을 살펴보기 위해 물,

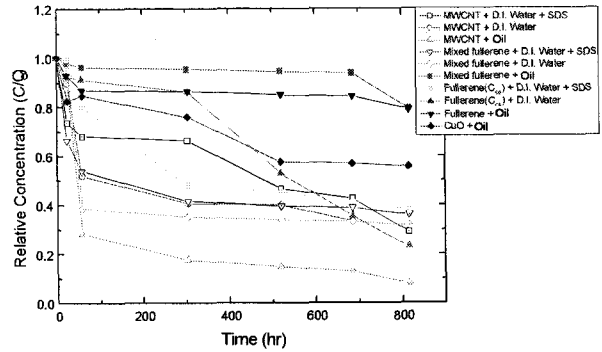


Fig. 5 Relative supernatant particle concentration of nanofluids with sediment time.

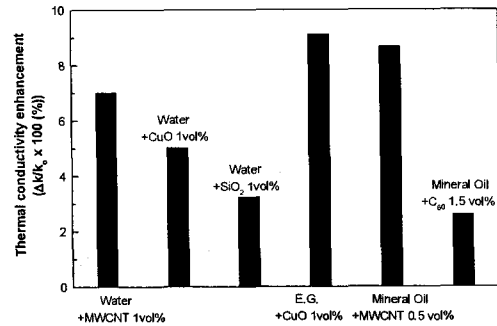


Fig. 6 Thermal conductivity enhancement of nanofluids.

에틸렌 글리콜과 Oil을 기본유체로 하고, MWCNT, CuO, SiO₂와 플러렌 입자를 이용하여 나노유체를 제조하였다. 나노유체의 열전도도를 측정하기 위하여 비정상 열전법을 사용하였으며, UV-vis spectrum 분석을 통하여 나노유체의 침전 시간에 따른 분산 안정성을 평가하였다. 나노유체의 열전도도 향상은 입자의 열전도도와 기본유체 열전도도에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다. 수계 나노유체의 경우 MWCNT 체적분율 1%에서 7%의 열전도도 증가율을 보였으며, 체적분율 1.5%의 플러렌 나노유체의 경우 3%의 열전도도 감소율을 보여 입자의 열전도도가 유체의 열전도도보다 낮을 경우 열전도도 감소가 발생함을 알 수 있었다. 물-MWCNT 나노유체의 열전도도 실험결과를 Jang & Choi 모델과 비교하였으며, 이 validation 결과로부터 MWCNT의 방향성과 Kapitza 저항을 증가시킴을 통해서 열전도도 증가율을 보다 크게 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 MWCNT의 유체내 분산성 향상을 통해서 열전도도의 향상이 이루어질 수 있음을 보이고 있다.

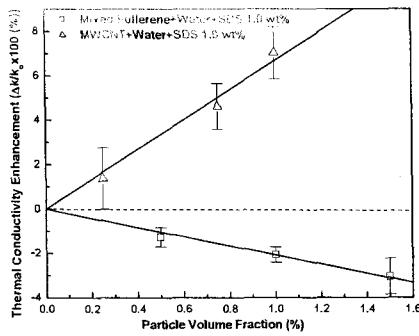


Fig. 7 Thermal conductivity enhancement of water based MWCNT and fullerene nanofluid.

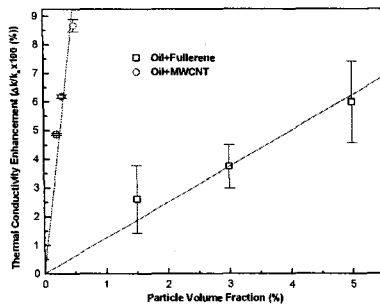


Fig. 8 Thermal conductivity enhancement of oil based MWCNT and fullerene nanofluid.

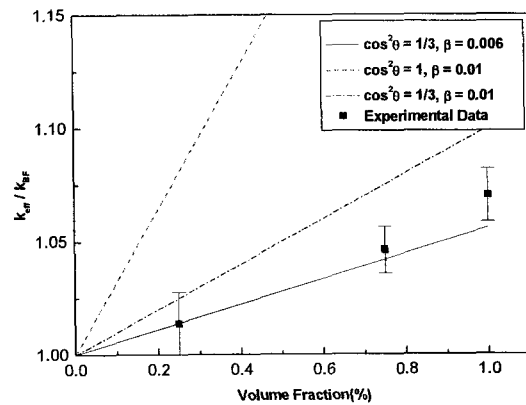


Fig. 8. Validation of the experimental results of the thermal conductivity of MWCNT nanofluids.

참고문헌

1. Bently, J. P., 1984, Temperature Sensor Characteristics and Measurement System Design, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 17, 430
2. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., and Grulke, E. A., 2001, Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions, Applied Physics Letters, Vol. 79, No. 14, pp. 2252 - 2254
3. Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., and Roetzel, W., 2003, Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids, Journal of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567-574
4. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., 2001, Anomalous Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles, Applied Physics Letters, Vol. 78, No. 6, pp. 718-720
5. Jiang, L., Gao, L. and Sun, J., 2003, Production of Aqueous Colloidal Dispersions of Carbon Nanotubes, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 260, pp. 89-94
6. Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., and McEuen, P. L., 2001, Thermal Transport Measurement of Individual Meltilwalled Nanotubes, Physical Review Letters, Vol. 87, No. 21, pp. 215502-1-2155002-4
7. 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, Vol. 14, pp.1435-1440
8. Yu, R. C., Tea, N., and Salamon, M. B., 1992, Thermal Conductivity of Single Crystal C₆₀, Physical Review Letters, Vol. 68, No. 13, pp. 2050- 2053
9. Yu-Jin Hwang, Young-Chull Ahn, Hee-Soo Shin, Chang-Il Jung, Hyung-Soo Noh, and Jae-Keun Lee (2002), A Study on Heat Transfer Characteristics in Suspensions of Micro-sized Particles(Microfluidics), The 3rd Korean Conference on Aerosol and Particle
5. Jiang, L., Gao, L. and Sun, J., 2003, Production of Aqueous Colloidal Dispersions of Carbon Nanotubes, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 260, pp. 89-94
6. Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., and McEuen, P. L., 2001, Thermal Transport Measurement

- of Individual Multiwalled Nanotubes, Physical Review Letters, Vol. 87, No. 21, pp. 215502-1-215502-4
7. 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, Vol. 14, pp.1435-1440
 8. Yu, R. C., Tea, N., and Salamon, M. B., 1992, Thermal Conductivity of Single Crystal C₆₀, Physical Review Letters, Vol. 68, No. 13, pp. 2050- 2053
 9. Yu-Jin Hwang, Young-Chull Ahn, Hee-Soo Shin, Chang-II Jung, Hyung-Soo Noh, and Jae-Keun Lee (2002), A Study on Heat Transfer Characteristics in Suspensions of Micro-sized Particles(Microfluidics), The 3rd Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, Yongpyung, 11-13, July pp.83-84.
 10. Eu-Gene Hwang, Hyung-Soo Noh, Jeung-Min Son, Dong-Geun Lee, Jae-Keun Lee (2003), A Study on Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanoparticles (Nanofluids), The 4th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, Yongpyung Resort, 3-5 , July pp.253-254
 11. Jin-wook Jung, Yu-jin Hwang, Hyeong-soo Park, Jeung-min Son, Jae-il Lee, Jae-keun Lee, 2004, An experimental investigation on viscosity of nanofluids in suspension of nanoparticles, The 5th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, Yongpyung Resort, 1-3, July, pp. 281-282
 12. Yu-jin Hwang, Jin-wook Jung, Hyeong-soo Park, Young-chull Ahn, Jae-keun Lee, Kam-gyu Lee, Byung-soon Kim, Woon-sup Lee, Jae-yeol Lee, Jong-ho Lee, 2004, Thermal conductivity of nanofluids depending on the stability and thermal conductivity of carbon nanoparticles, The 5th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, Yongpyung Resort, 1-3, July, pp. 283-284
 13. Jang, S. P. and Choi, S. U. S, 2004, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", Applied Physics Letters, pp.431-432
 14. Scott T. Huxtable, David G. Cahill, Sergei Shenogin, Liping Xue, Rahmi Ozisik, Paul Barone, Monica Usrey, Michael S. Strano, Giles Siddons, Moonsub Shim and Pawel Keblinski, 2003, "Interfacial heat flow in carbon nanotube suspensions", Nature Letters, pp. 731-734