

나노유체의 열전도율 실험과 열전달 메커니즘의 제시

박권하† · 이진아* · 김혜민**

(원고접수일 : 2008년 6월 17일, 원고수정일 : 2008년 8월 25일, 심사완료일 : 2008년 8월 27일)

Heat Conductivity Test and Conduction Mechanism of Nanofluid

Kweon-Ha Park† · Jin-A Lee* and Hye-Min Kim**

Abstract : Many studies have been conducted to increase heat transfer in fluid. One of the various heat transfer enhancement techniques is suspending fine metallic or nonmetallic solid powder in traditional fluid. Nanofluid is defined as a new kind of heat transfer fluid containing a very small quantity of nanometer particles that are uniformly and stably suspended in a liquid. This study investigates the effect of nanofluid containing diamond, CuNi and CuAg nanometer particles, and proposes the heat transport mechanism of nanofluid. The test result shows that the thermal conductivity of nanofluid is much higher than that of traditional fluid, and the increasing rate of the conductivity is dependent on the conductivity of the solid metal.

Key words : Nanofluid(나노유체), Nano-particle(나노입자), Thermal conductivity(열전도율), Diamond(다이아몬드), CuNi(구리-니켈), CuAg(구리-은)

1. 서 론

선박, 자동차, 항공 운송 산업에서의 냉각시스템, 건물에서의 냉난방시스템, 석유화학, 섬유, 제지, 화학, 식품, 산업제조 냉난방시스템 등에서 중요하게 사용되고 있는 열전달 물질은 산업의 고성능, 고효율화에 의하여 성능향상이 요구되고 있다^[1]. 특히, 미세 공정기술의 발달로 마이크로 혹은 나노크기의 시스템에서의 유체 유동 및 열적 특성에 대한 관심이 높아지고 있다.

이러한 나노크기 시스템에서의 전달물질로 사용

되는 미래 기술로 기존의 유체에 나노크기의 입자를 부유시켜 만든 나노유체가 연구되고 있다. 나노유체에 대한 연구는 열전달성을 분석하기 위한 실험적 연구와 나노유체의 열전달 기구를 규명하기 위한 이론적 연구로 구분된다. Xue^[2]과 Yu 등^[3]은 나노유체에 들어있는 고체입자와 기본 유체사이에서의 경계면에 대한 영향을 고려하여 나노유체의 열전도에 관한 새로운 모델을 만들었고, Keblinski 등^[4]은 나노유체에서의 열전도율의 증가에 대해서 나노입자의 브라운 운동(Brownian motion)등 네 가지의 가능성 있는 설명을 제시하였다. Xuan

† 교신저자(한국해양대학교 기계정보공학부, E-mail: khpark@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4367)

* 한국해양대학교 기계공학과 대학원

** 국방과학연구소

등⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾은 나노입자의 체적비와 열전달의 레이놀즈 수(Reynolds number), 유동특성에 따른 대류열 전달의 영향에 대해서 연구하였으며, 나노입자가 들어간 나노유체가 열전달을 개선시키는 이유와 Cu 나노입자를 기름과 물에 넣어서 그 특성을 비교하였다. 또한, 부유된 나노입자의 강화된 열전달을 분석하는 접근방법도 제시하였고 나노유체의 열전달 메커니즘(mechanism)을 설명하였다. Eastman 등⁽⁸⁾은 기본 유체인 에틸렌글리콜(ethylene glycol)에 대략적으로 평균직경이 10nm보다 작은 Cu 나노입자를 0.3 vol%의 비율로 섞으면 기존 유체에서 보다 열전도율이 약 40%까지 증가되었음을 보여주고 있고, Lee 등⁽⁹⁾은 Cu나 Al₂O₃ 나노입자들로 구성된 나노유체는 더 높은 열전도율을 나타낸다고 보고했다. 또한, Xie 등⁽¹⁰⁾에 의하면 에틸렌글리콜에 분산된 평균직경 35nm의 4vol% CuO 나노입자의 경우에 약 20%정도의 열전도율이 증가되었다. Choi 등⁽¹¹⁾은 오일에 1vol%의 탄소 나노튜브(carbon nanotube)를 혼합한 나노유체의 열전도율이 160% 상승됨을 보여주었다. Park 등⁽¹²⁾, Ma 등⁽¹³⁾은 진동전열관에서의 나노유체 영향을 연구하였다. 이상의 실험에 의하면 나노물질의 크기와 종류에 따라 열전달 특성이 변화하지만 열전도율 향상은 명백한 것으로 판단된다.

이론적 연구는 주로 나노유체의 열전도 메커니즘을 규명하기 위한 것으로, Choi⁽¹⁾는 Batchelor, O'Brien의 이론과 Hamilton, Crosser의 이론을 바탕으로 나노유체의 열전도율에 대해서 연구하였다. 이러한 이론적 해석에도 불구하고 나노유체의 열전달 메커니즘은 아직 명확하게 규명되지 않고 있는데, 원하는 나노분말의 제조가 어렵고 미세한 분말의 거동을 가시화하기 어려우며 분자운동과 연관된 물리학적 거동에 대한 규명이 어렵기 때문으로 생각된다.

본 연구에서는 다이아몬드, CuNi합금, CuAg합금 나노금속분말을 증류수와 에틸렌글리콜 용액에 넣어서 열전도율을 측정하였고, 용액에 대한 나노금속분말의 vol%와 측정온도에 따른 열전달 특성을 분석하고 예상되는 열전달 메커니즘을 제시하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 비정상 열선법

비정상열선법(Transient hot wire method)을 이용하여 나노금속분말이 들어있는 용액의 열전도율을 측정 하였다. 비정상열선법은 정상상태(steady state)법에서 문제가 되는 측정유체내의 대류효과가 나타나지 않고 비교적 간단히 장치를 구성하여 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

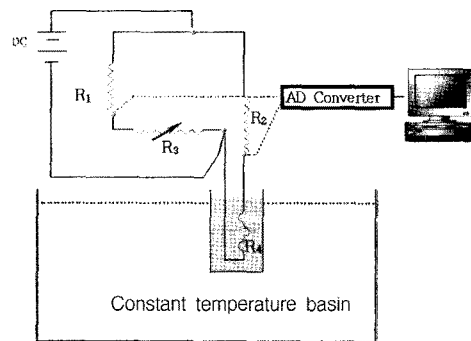


Fig. 1 Experimental setup for transient hot wire measurement

열전도율을 구하기 위해서 사용된 수학적 방정식은 식(1)과 같다.

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

푸리에 법칙으로부터 유도된 k 는 열전도율이고, q 는 단위길이 당 발열량이다. T_1 과 T_2 는 시간 t_1 과 t_2 에서의 온도이다. 선저항의 온도계수로부터 선의 온도증가는 시간에 따른 전기저항의 변화에 의해서 결정되어진다.

Fig. 1과 같이 구성되는 휘스톤브릿지(wheatstone bridge)를 이용하였으며, R_1 과 R_2 는 고정저항으로 각각15.4Ω로 주었다. R_3 는 가변저항이며, R_4 에 사용한 열선은 백금선으로 그 선의 두께가 25μm, 길이는 10cm이다. 여기서 얻은 데이터는 A/D 변환기로 변화하여 PC에 저장하였다. R_4 에 해당하는 백금선은 나노금속분말이 들어있는

나노유체가 담겨져 있는 메스실린더에 잠겨 있다. 실험의 온도조건에 따라서 초기온도를 유체와 동일하게 유지시켜 주고 순간적으로 전압을 넣어서 열선의 온도를 올리면 백금선의 저항이 변화된다. 이 저항의 변화를 전위차로 바꾸고 다시 온도차로 바꾸어 식(1)을 이용하여 열전도율을 구하였다.

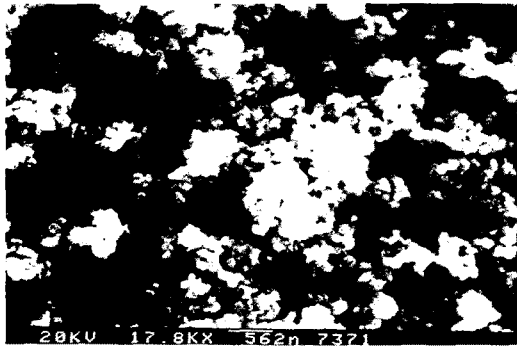


Photo. 1 The SEM micrograph of CuNi nanopowder

2.2 실험조건

나노합금용액의 열전도율 측정을 위한 실험조건은 Table 1과 같다. 나노 다이아몬드, CuNi와 CuAg를 사용하였으며 vol%로 0.025vol%에서 0.5vol%까지, 온도는 10℃와 40℃에서 실험하였다. 다이아몬드의 평균 직경은 25nm이며 CuNi와 CuAg의 평균 직경은 30nm이다. SEM 현미경으로 관찰한 CuNi 나노입자는 Photo.1과 같다.

Table 1 Test conditions for heat transfer

	CuNi	CuAg	Diamond
Averaged nanoparticle diameter(nm)	30	30	25
Volume percent(%)	0.2 0.3 0.4 0.5	0.025 0.060 0.100	0.048
Temperature range(℃)	10 40	10 40	10 40
용액	Ethylene glycol		Distilled water

3. 실험결과 및 고찰

3.1 다이아몬드 나노유체의 열전도율 특성

Fig. 2는 다이아몬드 나노분말을 포함한 유체의 온도변화에 따른 열전도율 비를 나타낸다. 열전도율 비는 증류수만을 사용하였을 경우의 열전도율 (k_f)에 대한 나노금속분말을 넣은 나노유체(k_n) 열전도율의 비로 나타내었다. 20 min은 나노분말을 초음파 혼합하여 20분 동안 정지 상태에서 보관한 후에 실험한 경우이며 180 min은 180분 후를 나타낸다.

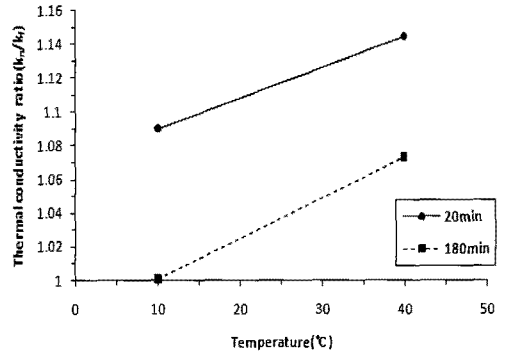


Fig. 2 Thermal conductivity ratio of diamond nanofluid

유체온도 10℃일 때 20분후 0.048 vol% 나노유체는 1.09배의 열전도율 상승을 나타낸다. 그러나 180분후에는 증류수와 거의 같은 열전도율을 보인다. 이는 나노분말의 대부분이 침전되었기 때문이다. 40℃일 때는 20분후 1.15배의 상승을 나타내며 180분후에 1.07배의 향상을 나타낸다. 10℃일 때에 비하여 더욱 높은 열전도율의 향상을 나타내는데 이는 고온에서 활발한 분자들의 움직임이 나노분말의 침전을 방지하고 열전달을 활성화한 것으로 생각된다.

3.2 구리합금 나노유체의 열전도율 특성

Fig. 3은 온도 10 ℃일 때 나노 CuNi와 CuAg 분말이 들어있는 에틸렌글리콜에서의 vol%에 따

른 열전도율비의 변화를 나타낸 그래프이다. 0.1vol%만큼 CuAg 나노금속분말을 첨가하였을 경우에는 기존의 유체에서보다 열전도율이 약 1.18배 커짐을 볼 수 있다. 또한, 0.5vol%의 CuNi 나노금속분말을 첨가한 경우에는 기존의 유체보다 약 1.28배 큰 열전도율을 나타낸다. CuNi와 CuAg 두 가지 경우를 가지고 열전도율을 비교해 보면 Table 2에서 볼 수 있듯이 은의 열전도율이 니켈의 열전도율보다 약 4배정도 더 크기 때문에 CuNi분말을 첨가한 유체에서보다 CuAg분말을 첨가한 유체에서 열전도율의 증가량이 더 큰 것을 볼 수 있다.

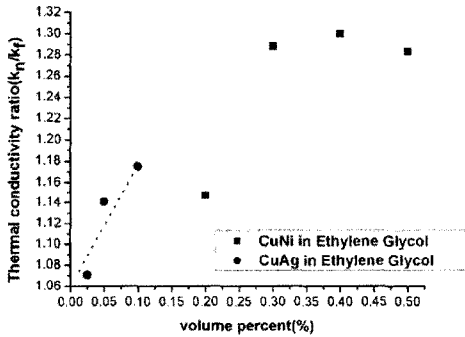


Fig. 3 Thermal conductivity ratio at 10°C

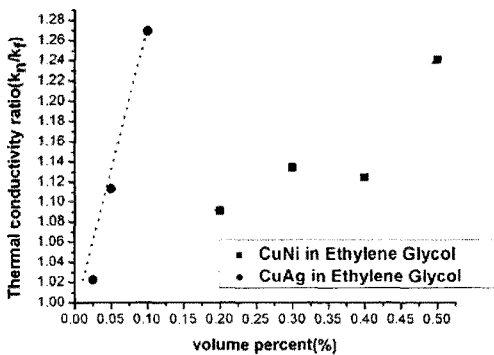


Fig. 4 Thermal conductivity ratio at 40°C

Fig. 4는 유체 온도가 40°C 일 때 나노 크기의 CuNi와 CuAg 분말이 들어있는 에틸렌글리콜에서의 vol%에 따른 열전도율의 비를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 CuAg 나노금속분말을 0.1vol%만큼 넣었을 때에는 열전도율의 비가 약

1.27정도이고, 0.5vol%만큼의 CuNi 나노금속분말을 넣은 경우에는 열전도율의 비가 약 1.24배 정도이다. 여기에서도 마찬가지로 나노금속분말을 넣은 유체가 기본 유체에서보다 열전도율이 크다는 것을 알 수 있다.

4. 나노유체의 열전달 특성

상기의 실험결과는 나노유체의 높은 열전도율특성을 명확히 보여준다. 이는 일반유체에 포함된 나노금속분말의 영향이다. 나노금속분말의 열전도율과 혼합을 만들 생각한다면 실험결과와 같은 높은 열전도율향상을 기대할 수 없다. 본 논문에서는 이를 설명하기 위하여 다음과 같은 나노유체의 열전달 메커니즘을 제시하고자한다.

4.1 금속의 높은 열전도 성질

일반적으로 기체와 액체의 열전도율은 금속 고체의 열전도율보다 작다. 금속 고체는 자유전자와 격자라고 불리는 주기적인 배열 내에 묶여 있는 원자들로 구성되어 있다고 할 수 있다. 따라서 열에너지의 전달은 자유전자의 이동과 격자 진동과라는 두 가지 효과에 의한 것이다. 그러나 유체상태에서는 분자 사이의 간격이 크기 때문에 열전도율이 고체상태와 비교하여 매우 낮게 된다. Table 2는 금속과 유체의 열전도율을 비교하고 있다. 은(Ag)의 열전도율을 보면 에틸렌글리콜의 열전도율보다 약 1700배 정도 크다는 것을 알 수 있고, 구리의 경우는 에틸렌글리콜에 비하여 약1600배나 큰 열전도율을 가지고 있으며 니켈은 약 360배 정도 열전도율이 크다. 특히 다이아몬드는 이들보다 매우 크다. 따라서 나노금속분말의 높은 전도율은 나노유체의 열전도 성질을 향상시킨다고 할 수 있다. 그러나 혼합물이 열전도율향상에 미치는 영향은 실험결과와 비교하면 매우 적다.

4.2 나노유체의 냉각 메커니즘 제시

나노유체는 나노크기의 고체분말을 혼합한 유체이다. 나노입자는 분자크기의 10배에서 100배정도

이기 때문에 물질의 일반적인 물성을 나타내는 동시에 분자나 원자 고유의 성질을 갖게 되는데 특히 유체에 혼합하는 경우 중력의 작용에 상관하지 않고 무작위로 움직이는 브라운 운동과 같은 거동을 예측할 수 있다.

Table 2 Comparison of thermal conductivities

Materials	Thermal conductivity (W/mK)	Specific gravity (g/cm ³)
Diamond	2200	3.52
Ag	429	10.5
Cu	401	8.93
Ni	90.7	8.9
Ethylene glycol	0.25	1.1088
Distilled water	0.6	1

나노분말의 이러한 독특한 성질들은 나노유체의 열전달 향상에 복합적인 영향을 미치는 것으로 생각된다. 하지만 나노크기의 분말을 생산하거나 실험적으로 분석하는 것 자체가 어렵고 분자역학적 해석은 한계가 있으며 고전이론에 의한 모델수립도 많은 문제를 갖고 있다. 이러한 복잡한 현상에도 불구하고, 본 연구에서는 나노금속분말의 불안정한 특성과 분자 거동 등을 종합적으로 고찰하여 다음과 같은 나노유체의 열전달 메커니즘을 제시하고자 한다.

첫째, 극저온 영역에서 열전달을 주도하는 자유전자(Free electron)가 나노유체의 경우 상온에서도 다량 존재함으로써 열전달 특성을 향상시키는 것이며, 둘째는 금속입자 표면의 홀전자(unpaired electron)가 유체분자를 끌어당겨 마치 금속입자와 유사한 밀집된 구조를 형성하는 준격자(quasi-lattice) 성장에 의한 열전달 촉진 현상이며, 셋째는 성장된 금속입자들이 브라운 운동에 의하여 상호 충돌함으로써 직접 금속 간 열전달에 의한 열전달 향상, 본 논문에서는 이를 거시적 격자진동(macroscopic lattice vibration)이라 명칭한다.

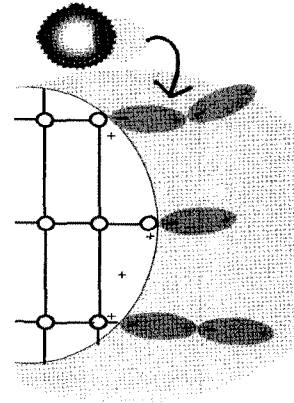


Fig. 5 Quasi-lattice growing on the surface

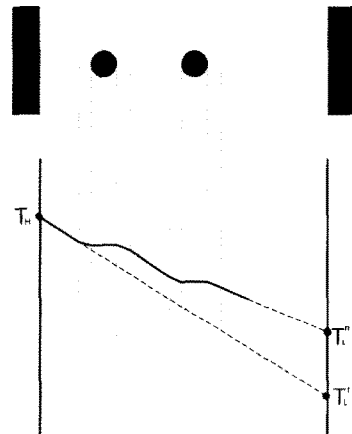


Fig. 6 Heat transport with grown nanometer particles

Fig. 5는 액체 분자들이 나노금속분말 표면 주위에서 준격자를 이룬다고 가정하였을 때를 그림으로 나타낸 것이다. 일반적으로 사용되어지는 나노입자들의 크기는 1nm에서 100nm정도이고, 액체 분자들의 크기는 0.1nm에서 10nm정도이다. 그러므로 나노입자가 부유되어 있는 나노유체에서 나노입자의 크기는 액체 분자의 크기보다 적어도 10배 이상은 크다는 것을 알 수 있다. 위 그림은 홀로 있는 불안정한 전자들이 나노크기의 입자들 표면에 분포되어 있으며 그것들이 액체 분자들을 끌어당겨 마치 액체 분자들도 고체와 같이 격자를 생성하고 있는 모습을 보여주고 있다. 이런 현상들로 인하여 표면층의 분자 구조는 벌크 상태의 액체에서보다 더 질서 있는 구조를 이룰 것이고 계면을 이루는

액체의 열전도율이 벌크상태에 있는 액체의 열전도율보다 더 높게 나타난다.

이렇게 성장한 나노입자들이 유체에 포함되면 Fig.6과 같이 열전달율을 증가시킨다. 좌측 고온 벽에서 유체를 지나는 동안 열전달이 잘 이루어지지 않아 급격한 온도 변화를 나타낸 후 나노입자 주변의 성장영역에 들어가면 조밀구조의 유체분자들에 의하여 열전달이 향상되며, 이후 금속입자 영역에서 더욱 빠른 열전달을 나타냄으로써 전체적인 열전달 속도를 증가시킨다. 동시에 금속열전달의 격자파동과 유사한 거시적 관점에서의 나노입자간의 진동파동은 나노유체의 열전달 성능을 더욱 향상시킨다.

상기의 메커니즘이 종합적으로 작용하여 나노유체의 열전달성이 크게 향상되는 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다이아몬드, CuAg와 CuNi 나노분말을 포함한 나노유체의 열전도 특성을 기준유체의 열전도 특성과 비교 검토하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 다이아몬드나노유체: 증류수에 0.048 vol% 혼합한 경우 유체온도 10℃에서 40℃ 범위에서 열전도율이 9-15% 향상되었다.

2) CuAg나노유체: 에틸렌글리콜에 CuAg 나노분말 0.1vol%를 혼합한 경우 유체온도 10℃에서 40℃ 범위에서 17% 열전도율 상승을 나타내었다.

3) CuNi나노유체: 0.5vol% 혼합한 경우 24-28%의 상승을 나타내었다.

4) 유체 온도의 영향: 다이아몬드나노유체에서는 온도가 증가하면 열전도율이 더욱 상승하였지만 CuAg의 경우 vol%에 따라 혼돈되는 경향을 나타내었고 CuNi는 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 10℃와 40℃의 비교적 낮은 온도에서 다소 큰 비중을 갖고 있는 나노유체의 부라운 운동은 열전달 향상에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

5) 나노유체의 열전달 메커니즘을 제시하였지만 이는 이론적인 고찰에 의한 것으로 분자역학적인

관점에서 실험 및 해석적 연구가 요구된다.

참고문헌

- [1] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang.(Eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, ASME, New York, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, pp.99-105, 1995.
- [2] Q.Z. Xue, Model for effective thermal conductivity of nanofluids, Phys. Lett. A, Vol. 307, pp.313-317, 2003.
- [3] W. Yu, S.U.S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model, J. Nanoparticle Research, Vol. 5, pp.167-171, 2003.
- [4] P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp.855-863, 2002.
- [5] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convection heat transfer and flow features of nanofluids, J. Heat Transfer, vol. 125, pp.151-155, 2003.
- [6] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp.58-64, 2000.
- [7] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp.3701-3707, 2000.
- [8] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson, Anomalously

increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nano-particles, Appl. Phys. Lett., Vol. 78 (6), pp. 718-720, 2001.

- [9] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, ASME J. Heat Transfer, Vol. 121, pp.280, 1999.
- [10] H.Q. Xie, J.C. Wang, T.G. Xi, Y. Liu, F. Ai, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, J. Appl. Phys., Vol. 91, pp.4568-4572, 2002.
- [11] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, E.A. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, Appl. Phys. Lett., Vol. 79, pp.2252-2254, 2001.
- [12] K. Park and H. B. Ma, Nanofluid effect on heat transport capability in a well-balanced oscillating heat pipe, Journal of thermophysics and heat transfer, AIAA, Vol. 21, No. 2, pp. 443-445, 2007.
- [13] H. B. Ma, C. Wilson, Q. Yu, K. Park, U. S. Choi and Murli Tirumala, An experimental investigation of heat transport capability in a nanofluid oscillating heat pipe, ASME Journal of heat transfer, Vol. 128, No. 11, pp. 1213-1216, 2006.

저 자 소 개



박권하(朴權夏)

1995년 UMIST(맨체스터대학) 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1995-1998년 한국기계연구원 엔진환경연구부 선임연구원, 1998-현재 한국해양대학교 부교수, 내연기관 연구



이진아(李陳娥)

2008년 한국해양대학교 기계시스템공학 전공 졸업(학사), 2008년 현재 한국해양대학교 대학원 기계공학과 석사과정



김혜민(金惠敏)

2004년 한국해양대학교 기계시스템공학 전공 졸업(학사), 2006년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 2008년 현재 국방과학연구소