

나노금속분말을 혼합한 용액이 열전달에 미치는 영향

김혜민⁺, 최순호⁺⁺, 정재현⁺⁺⁺, 박권하⁺⁺⁺

The effects of nanofluid containing metal nano-powder on heat transfer

Hye-Min Kim⁺, Soon-Ho Choi⁺⁺, Jae-hyun Jeong⁺⁺⁺, Kweonha Park⁺⁺⁺

Abstract : Many studies have been conducted to increase heat transfer in fluid. One of the various heat transfer enhancement techniques is to suspend 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. In this study CuNi or CuAg nano particles are used to investigate heat transfer enhancement. The result shows the thermal conductivity of nanofluid is much higher than that of traditional fluid.

Key words : nanofluid(나노유체), Nano-powder(나노분말), Thermal conductivity(열전도율), CuNi(구리-니켈), CuAg(구리-은), Ethylene glycol(에틸렌글리콜).

1. 서 론

자동차나 항공 운송 산업에서의 냉각시스템, 건물에서의 순환 식 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.

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]와 Yu^[3]은 나노유체에 들어있는 고체입자와 기본 유체사이에서의 경계면에 대한 영향을 고려하여 나노유체의 열전도에 관한 새로운 모델을 만들었고, Keblinski^[4]은 나노유체에서의 열전도율의 증가에 대해서 나노입자의 브라운 운동

(Brownian motion)등 네 가지의 가능성 있는 설명을 제시하였다. Xuan^{[5],[6],[7]}은 나노입자의 체적비와 열전달의 레이놀즈 수(Reynolds number), 유동특성에 따른 대류열전달의 영향에 대해서 연구하였으며, 나노입자가 들어간 나노유체가 열전달을 개선시키는 이유와 Cu 나노입자를 oil과 물에 넣어서 그 특성을 비교하였다. 또한, 부유된 나노입자의 강화된 열전달을 분석하는 접근방법도 제시하였고, 나노유체의 열전달 메카니즘(Mechanism)을 설명하였다. Eastman^[8]은 기본 유체인 에틸렌글리콜(Ethylene glycol)에 대략적으로 평균직경이 10nm보다 작은 Cu 나노입자를 0.3 vol%의 비율로 섞으면 기존 유체에서 보다 40%까지 증가되었음을 보여주고 있고, Lee^[9]은 CuO나 Al₂O₃ 나노입자들로 구성된 나노유체는 더 높은 열전도율을 나타낸다는 것을 입증하고 있다. 또한, Xie^[10]에 의하면 에틸렌글리콜에 분산된 평균 직경 35nm의 4vol% CuO 나노입자의 경우에 대략 20%정도의 열전도율이 증가되었다. Choi^[11]은 오일에 1vol%의 탄소 나노튜브(Carbon nanotube)를 혼합

+ 책임저자 (한국해양대학교 대학원 기계공학과), E-mail:bbuln@korea.com, Tel: 051)410-4953

++ 한국해양대학교 해사대학

+++ 한국해양대학교 기계정보공학부

한 나노유체의 열전도율이 160% 상승됨을 보여주었다. 이상의 실험에 의하면 나노물질의 크기와 종류에 따라 열전달 특성이 변화하지만 열전도율 향상은 명확한 것으로 판단된다.

이론적 연구는 주로 나노유체의 열전도 메커니즘을 규명하기 위한 것으로 경험에 의한 가설이 있다. 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, 이는 나노분말의 제조가 어려워서 실험에 한계가 있기 때문이다.

본 연구에서는 CuNi합금, CuAg합금 나노금속분말을 에틸렌글리콜 용액에 넣어서 열전도율을 측정하였고, 용액에 대한 나노금속분말의 vol%와 측정온도에 따른 열전달 특성을 분석하였다.

2. 나노유체의 열전달 특성

2.1 금속의 높은 열전도 성질

일반적으로 기체와 액체의 열전도율은 금속 고체의 열전도율보다 매우 작다. 금속 고체는 자유전자와 격자라고 불리는 주기적인 배열 내에 묶여 있는 원자들로 구성되어 있다고 할 수 있다. 따라서 열에너지의 전달은 자유전자의 이동과 격자 진동파라는 두 가지 효과에 의한 것이다. 그러나 유체상태에서는 분자 사이의 간격이 고체상태에서보다 매우 넓고 분자운동이

Table. 1 Comparison of thermal conductivities

Materials	Thermal conductivity(W/mK)
Ag	429
Cu	401
Ni	90.7
Ethylene glycol	0.25

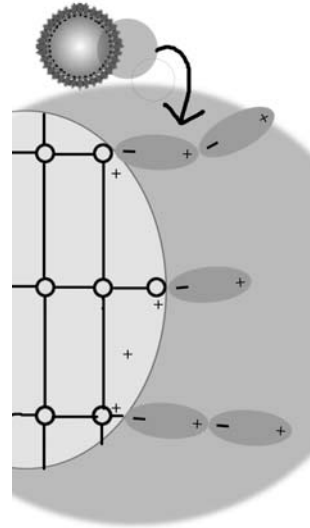


Fig.1 Quasi-lattice growing on the surface

고체상태에서보다 더 불규칙적이므로, 열에너지 전달은 덜 효과적이다.

Table. 1은 금속과 유체의 열전도율을 비교하고 있다. 은(Ag)의 열전도율을 보면 에틸렌글리콜의 열전도율보다 약 1700배 정도 크다는 것을 알 수 있고, 구리(Cu)의 경우는 에틸렌글리콜에 비하여 약1600배나 큰 열전도율을 가지고 있으며 니켈은 약 360배 정도 열전도율이 크다. 따라서 나노금속분말에 의한 열전도 성질은 향상된다고 예측할 수 있다.

2.2 나노유체의 냉각 메커니즘의 제시

나노유체는 나노크기의 고체분말을 혼합한 유체이다. 일반적으로 사용되어지는 나노입자들의 크기는 1nm에서 100nm정도이고, 액체분자들의 크기는 0.1nm에서 10nm정도이다. 그러므로 나노입자가 부유되어 있는 나노유체에서 나노입자의 크기는 액체 분자의 크기보다 10배 정도 크기 때문에 물질의 일반적인 물성을 나타내는 동시에 분자나 원자 고유의 성질을 갖게 되는데, 특히 유체에 혼합하는 경우 중력의 작용에 상관하지 않고 무작위로 움직이는 브라운 운동(Brownian motion)과 같은 거동을 예측할 수 있다.

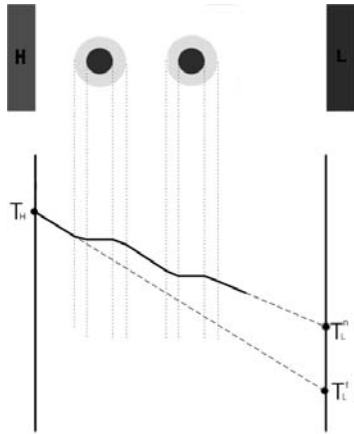


Fig. 2 Heat transport with grown nanometer particles

나노분말의 이러한 독특한 성질들은 나노유체의 열전달 향상에 복합적인 영향을 미치는 것으로 생각된다. 하지만 나노크기의 분말을 생산하거나 실험적으로 분석하는 것 자체가 어렵고 분자역학적인 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 electrons)가 나노유체에 다량 존재함으로써 열전달 특성을 향상시키는 것이며, 둘째는 금속입자 표면의 unpaired electron이 유체분자를 끌어당겨 마치 금속입자와 유사한 밀집된 구조를 형성하는 quasi-lattice 성장에 의한 열전달 촉진 현상이며, 셋째는 성장된 금속입자들이 브라운 운동에 의하여 상호 충돌함으로써 직접 금속 간 열전달현상이다. 본 논문에서는 이를 macroscopic lattice vibration이라 명칭한다.

Fig.1은 액체 분자들이 나노금속분말 표면 주위에서 Quasi-lattice를 이룬다고 가정하였을 때를 그림으로 나타낸 것이다. 이 그림은 홀로 있는 불안정한 전자들이 나노크기의 입자들 표면에 분포되어 있으며 그것들이 액체 분자들을 끌어당겨 마치 액체 분자들도 고체와 같이 격자를 생성하고 있는 모습을 보여주고 있

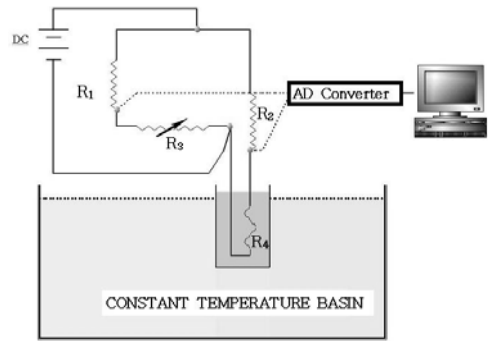


Fig. 3 Experimental setup for transient hot wire measurement

다. 이런 현상들로 인하여 표면층의 분자 구조는 벌크 상태의 액체에서보다 더 질서 있는 구조를 이루고 계면을 이루는 액체의 열전도율이 벌크상태에 있는 액체의 열전도율보다 더 높게 나타난다.

이렇게 성장한 나노입자들이 유체에 포함되면 Fig.2와 같이 열전달율을 증가시킨다. 좌측 고온 벽에서 유체를 지나는 동안 열전달이 잘 이루어지지 않아 급격한 온도 변화를 나타낸 후 나노입자 주변의 성장영역에 들어가며 조밀구조의 유체분자들에 의하여 열전달이 향상되며, 이후 금속입자 영역에서도 더욱 빠른 열전달을 나타냄으로써 전체적인 열전달 속도를 증가시킨다. 또한 거시적인 격자운동인 브라운 운동을 하면서 마치 금속 열전달의 phonon 운동처럼 고체와 고체들의 직접적인 접촉에 의하여 열전달 성능을 향상시킨다.

상기의 메커니즘이 종합적으로 작용하여 나노유체의 열전달성이 크게 향상되는 것으로 생각된다.

3. 실험장치 및 조건

3.1 비정상 열선법

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

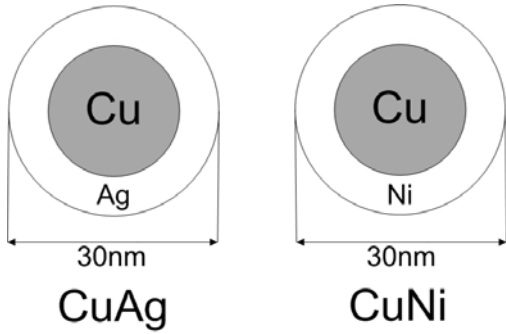


Fig. 4 Shapes of metal nano-powder

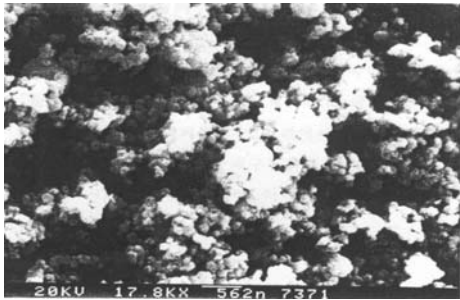


Fig. 5 The SEM micrograph of CuNi nano-powder

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 t_1 과 t_2 에서의 온도이다. 선저항의 온도계수로부터 선의 온도증가는 시간에 따른 전기저항의 변화에 의해서 결정되어진다.

Fig. 3은 휘스톤브릿지(Wheatstone bridge)를 이용한 비정상열선법 실험장치이며, R1과 R2는 고정저항으로 각각15.4Ω로 주었다. R3는 가변저항이며, R4에 사용한 열선은 백금선으로 그 선의 두께가 25μm, 길이는 10cm이다. 여기서 나온 데이터는 A/D 변환기로 변화하여 PC에 저장하였다. R4에 해당하는 백금선은

Table. 2 Test conditions for heat transfer

	CuNi	CuAg
Averaged nanoparticle diameter(nm)	30	30
Volume percent(%)	0.2	0.025
	0.3	0.060
	0.4	0.100
	0.5	
Temperature range(°C)	5	5
	10	10
	20	20
	30	30
	50	50
원료 제조법	RF 플라즈마	
용액	Ethylene glycol	

나노금속분말이 들어있는 나노유체가 담겨져 있는 메스실린더에 잠겨 있다. 실험의 온도조건에 따라서 초기온도를 유체와 동일하게 유지시켜 주고 순간적으로 전압을 넣어서 열선이 열을 받게 하여 저항의 변화를 주었다. 이 저항의 변화를 전위차로 바꾸고 다시 온도차로 바꾸어 식(1)을 이용하여 열전도율을 구하였다.

3.2 실험 조건

나노합금용액의 열전도율 측정을 위한 실험조건은 Table.2와 같다. 나노 CuNi와 CuAg를 사용하였으며 vol%로 0.025vol%에서 0.5vol%까지, 온도는 5°C에서 50°C까지 변화하여 실험하였다.

원료는 13.56MHz의 고주파 유도로 RF플라즈마 반응로 시스템을 이용하여 제조한 분말이다. 이렇게 하여 생산된 나노금속분말의 형상은 Fig.4와 같다. 중심에 Cu원자가 있고 그 주위에 Ag 혹은 Ni원자가 둘러싸고 있는 합금분말형태이며 평균 직경은 30nm이다. SEM 현미경으로 관찰한 CuNi 나노입자는 Fig.5와 같다.

4. 실험결과 및 고찰

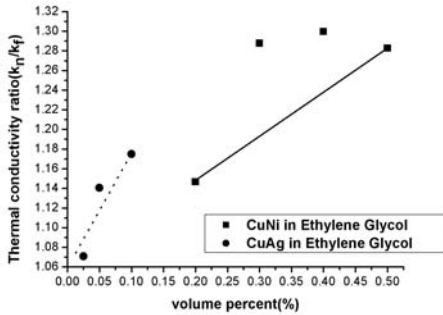


Fig. 6 Thermal conductivity ratio at 10°C

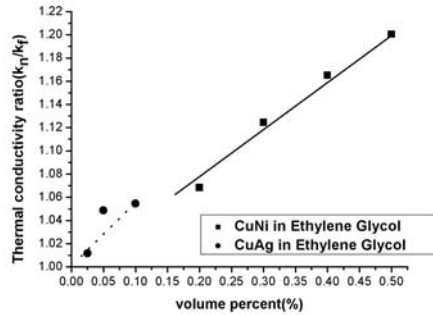


Fig. 8 Thermal conductivity ratio at 50°C

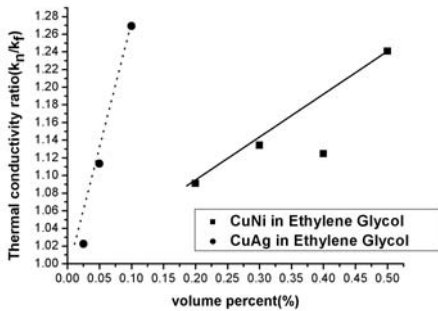


Fig. 7 Thermal conductivity ratio at 20°C

CuNi, CuAg의 나노금속분말을 넣은 에틸렌글리콜에 잠겨있는 백금선의 저항의 변화를 측정하여 온도변화로 바꾸어 열전도율을 구하였다.

Fig. 6는 온도 10 °C일 때 나노 CuNi와 CuAg 분말이 들어있는 에틸렌글리콜에서의 백금선의 vol%에 따른 열전도율비의 변화를 나타낸 그래프이다. 열전도율 비는 에틸렌글리콜만을 사용하였을 경우의 열전도율(k_f)에 대한 나노금속분말을 넣은 에틸렌글리콜 나노유체(k_p)의 열전도율의 비로 나타내었다. 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. 1에서 볼 수 있듯이 은의 열전도율이 니켈의 열전도율보다 약 4배정도 더 크기 때문에 CuNi분말을 첨가한 유체에서보다 CuAg분

말을 첨가한 유체에서 열전도율의 증가량이 더 큰 것을 볼 수 있다.

Fig. 7는 초기 온도가 20°C 일 때 나노 크기의 CuNi와 CuAg 분말이 들어있는 에틸렌글리콜에서의 백금선의 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. 또한, CuAg 나노금속분말을 넣은 유체가 CuNi 나노금속분말을 넣은 유체보다 열전도율의 증가가 크다는 것도 확인 할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6, Fig. 7과 마찬가지로 vol%에 따른 열전도율의 변화를 초기온도가 50°C일 경우에 대해서 보여주고 있는 그래프이다. CuAg 나노금속분말이 0.1vol% 정도 들어갔을 경우에 약 1.05배 정도의 열전도율 비를 보여주고 있으며, CuNi 나노금속분말이 에틸렌글리콜에 0.5vol%정도 첨가된 경우에는 약 1.20배 정도 열전도율이 증가했음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 에틸렌글리콜에 CuNi와 CuAg 나노금속분말을 첨가한 나노유체의 열전도 특성을 기존유체의 열전도 특성과 비교 실험하였다. 에틸렌글리콜에 CuAg 나노분말 0.1vol%를 혼합한 경우 17% 열전도율 상승을 나타내며, CuNi를 0.5vol% 혼합한 경우

24%의 상승을 나타낸다. 또한 유체의 온도는 나노유체의 열전도도에 큰 영향이 없었다.

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*, 307, pp313-317, 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* 5, pp167-171, 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* 45, pp855-863, 2002.

[5] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convection heat transfer and flow features of nanofluids, *J. Heat Transfer*, vol125, pp.151-155, 2003.

[6] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *Int. J. Heat and Fluid Flow* 21, pp.58-64, 2000.

[7] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *Int. J. Heat and Mass Transfer* 43, pp3701-3707, 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 nanoparticles, *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* 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.* 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.* 79, pp.2252-2254, 2001.