

물-기반 금나노유체의 분산안정성이 열전도도에 미치는 영향

최태종* · 김현진** · 이승현* · 박용준** · 장석필*,†

The Effect of Suspension Stability on the Thermal Conductivity Enhancement of Water-based Au Nanofluids

Tae Jong Choi, Hyun Jin Kim, Seung-Hyun Lee, Yong Jun Park and Seok Pil Jang

Key Words: Thermal Conductivity(열전도도), Suspension Stability(분산안정성), Au Nanofluids(금나노유체), Temperature Dependency(온도의존성)

Abstract

This paper experimentally reports the effect of suspension stability on the thermal conductivity of water-based Au nanofluids. For this purpose, the water-based Au nanofluids are prepared by the one-step method called electro-chemical method with volume fraction of 0.0005%. The thermal conductivity of water-based Au nanofluids is measured from 22°C to 42°C using the transient hot wire method. To quantify the suspension stability of Au nanofluids, the suspension stability of nanofluids is evaluated using the in-house developed laser scattering system at a fixed wavelength of 632.8nm with the elapsed time. Based on the experimental results, the both thermal conductivity and suspension stability of water-based Au nanofluids are gradually decreased according to the time. These results experimentally show that the suspension stability of water-based Au nanofluids is the one of the important factor of thermal conductivity.

기호설명

T : 온도 [°C]
 k : 열전도도 [W/mK]
 q : 단위길이당 입력열량 [W/m]
 t : 시간
 I_0 : 나노유체의 초기 Laser 투과 강도 [mW]
 I : 시간 경과에 따른 나노유체의 Laser 투과 강도 [mW]
 ε : 분산안정성 열화계수

1. 서론

나노유체는 기존에 사용되고 있는 물이나 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol)등의 냉각유체에 비해 우수한 열성능을 가진다고 보고되고 있으며⁽¹⁻⁵⁾ 이를 이용하여 차량용 엔진 냉각, 열교환기, 히트파이프등 다양한 열교환 시스템에 적용하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 기존의 나노유체의 열전도도 연구 결과에 따르면 나노유체의 열전도도는 기본유체와 사용된 나노입자의 종류에 따라 다르다고 보고되고 있으며, 특히 유체에 포함된 입자의 부피비에 따라 나노유체의 열전도도가 선형적으로 증가한다고 보고되고 있다^(9,10). 또한, 나노입자의 부피비 외에도 나노유체의 pH, 사용된 입자의 크기, 온도, 첨가제 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다고 보고하고 있다⁽¹¹⁻¹⁴⁾. 뿐만 아니라 나노유체의 열전도도에 영향을 미치는 인자로 분산안정성이 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^(15,16).

(Received: 7 June 2016, Received in revised form: 16 June 2016, Accepted: 17 June 2016)

*한국항공대학교 항공 우주 및 기계공학부

**국방기술품질원

†책임저자, 회원, 한국항공대학교

E-mail : spjang@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0179 FAX : (02)3158-4191

나노유체의 분산안정성과 열전도도에 대한 선행연구로는, 2006년 Liu *et al.*⁽¹⁵⁾은 물-기반의 구리 나노유체의 열전도도를 시간에 따라 측정하여 보고하였으며, 나노유체의 열전도도는 시간에 따라 감소한다고 보고하였다. 2006년 Hong *et al.*⁽¹⁶⁾은 에틸렌글리콜-기반의 철 나노유체의 열전도도를 시간에 따라 측정하였으며, 시간 경과에 따라 나노유체의 열전도도는 감소하는 경향을 갖는다고 보고하였다. 선행된 두 연구결과 모두 시간에 따라 나노유체의 열전도도가 감소하는 경향을 보였으며, 열전도도의 감소 원인은 시간에 따라 나노유체에 포함된 입자가 서로 엉겨 입자의 크기가 증가하기 때문이라 보고하였다. 다른 연구로는 2015년 Kim *et al.*⁽¹⁷⁾은 분산안정성이 열전도도 향상에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 다양한 형상을 가지는 Al₂O₃ 나노입자를 포함한 물-기반의 나노유체의 열전도도를 측정하였으며, 나노유체의 분산안정성은 입자 형상에 영향을 받고 분산안정성이 우수할수록 열전도도가 향상된다고 보고하였다. 그러나 기존에 보고된 연구결과는 시간에 따른 나노유체의 열전도도와 입자 크기만을 측정하여 입자 크기와 열전도도가 관계가 있다고 보고하거나, 입자의 형상이 각기 다른 나노유체를 사용하여 분산안정성이 나노유체의 열전도도에 영향을 준다고 보고하고 있어 나노유체의 분산안정성과 열전도도를 직접적이며 정량적으로 비교한 연구는 수행되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 나노유체의 분산안정성과 열전도도를 시간에 따라 측정하여 정량적으로 비교하였으며, 이를 위해 Laser Scattering 방법⁽⁷⁾ 및 비정상열선법(Transient Hot Wire Method)⁽¹⁴⁾를 사용하여 분산안정성과 열전도도를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 열전도도 측정 장치 및 측정 방법

본 연구에서 사용된 물-기반의 금나노유체는 분산안정제를 사용하지 않고 electro-chemical 방법을 이용하여 0.0005%의 부피비로 제작하였으며, 제작된 나노유체 및 TEM Image는 Fig. 1 과 같다.

제작된 물-기반 금나노유체의 열전도도는 비정상열선법(Transient Hot Wire Method)을 사용하여 측정하였다⁽¹⁴⁾. 비정상열선법은 백금선에 전압을 가하여 백금선의 저항 변화를 측정된 후 온도로 변환하여 유체의 열전도도를 측정하는 방법으로써, 준정상상태법(Quasi Steady-state

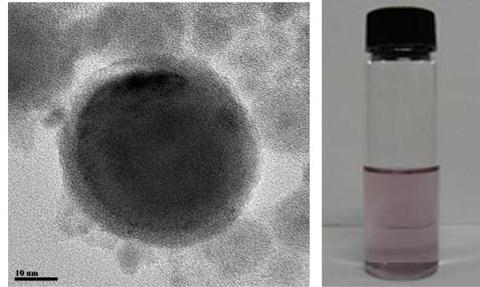


Fig. 1 TEM image of Au nanoparticle and water-based Au nanofluids

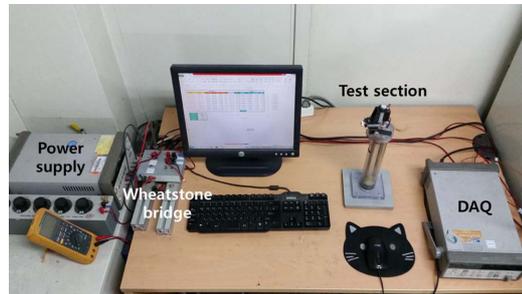


Fig. 2 Experimental apparatus of transient hot wire method

Method)에 비해 짧은 시간 내에 열전도도 측정이 가능하므로 자연대류의 영향을 최대한 줄일 수 있는 장점을 가진다⁽¹⁹⁾. 본 연구에서 사용된 비정상열선법을 이용한 열전도도 측정 장치는 Fig. 2과 같으며, 실험장치는 전기 절연을 위해 Teflon[®] 코팅된 백금선을 포함한 Test Section, 백금선의 저항 변화를 측정하기 위한 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge), 결과의 수집과 저장을 위한 자료획득기(Agilent, 34970A) 및 DC파워서플라이(Agilent, E3931A)로 구성되어있다.

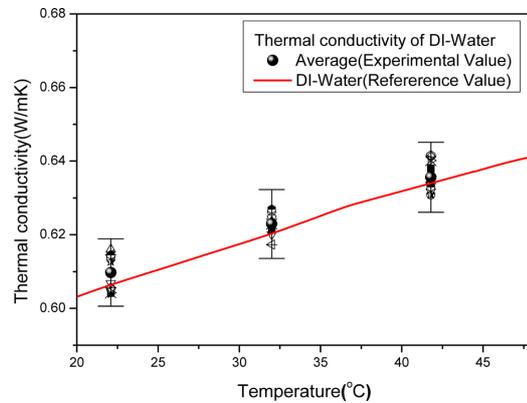


Fig. 3 Validation of transient hot wire method

비정상열선법을 이용하여 열전도도를 측정하기 위한 기본 방정식은 열확산방정식(Heat Diffusion Equation)으로부터 다음 식 (1)과 같이 유도된다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{d(\Delta T)}{d(\ln t)} \quad (1)$$

여기서 k , q , T 그리고 t 는 각각 열전도도, 단위 길이 당 입력 열량, 온도 그리고 시간을 의미한다. 위에 식에서 q 는 일정한 값을 가지므로 $\Delta T/\ln t$ 가 열전도도를 결정하는 변수이며, 정확한 열전도도 측정을 위해 ΔT 와 $\ln t$ 의 선형성이 매우 중요하다. 선형성 분석을 위하여 선형회귀 분석 기법을 이용하였으며, 선형성을 나타내는 R^2 값이 0.9999이상일 경우 정확하게 열전도도가 측정된 것으로 판단하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 비정상열선법을 사용한 열전도도 측정장치는 물을 측정하여 검증 수행하였다. 검증결과, $\pm 1.5\%$ 의 오차범위를 갖는 것을 확인하였으며 검증결과는 Fig. 3과 같다.

2.2 분산안정성 측정 장치 및 측정 방법

물-기반 금나노유체의 분산안정성 평가는 632.8 nm의 파장을 가지는 He-Ne Laser를 측정 샘플의 중층부에 조사한 후 투과된 광량을 측정하는 방법인 Laser Scattering 방법을 사용하여 분산안정성을 나타내었다⁽⁷⁾. Fig. 4는 본 연구팀이 제작한 Laser Scattering기법을 이용한 나노유체의 분산안정성 측정 장치이다. 그림에서 보이는 바와 같이 실험장치는 $\lambda = 632.8$ nm, 200 mW를 가지는 He-Ne Laser(HNL255R, Thorlabs), Photodiode(S120C, Thorlabs) 및 Power Meter(PM200, Thorlabs)로 구성되며, 분산안정성 열화는 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$\varepsilon(t) = \frac{I_0}{I(t)} \quad (2)$$

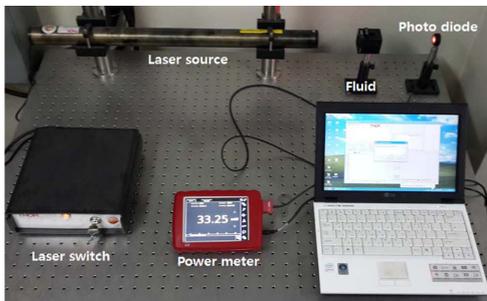


Fig. 4 Experimental apparatus of laser scattering method

여기서 I_0 , $I(t)$, t 와 ε 는 각각 나노유체의 초기 Laser 투과 강도, 시간 경과에 따른 나노유체의 Laser 투과 강도, 경과 시간 그리고 분산안정성 열화를 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전도도 측정 결과

물-기반 금나노유체의 열전도도는 비정상열선법을 사용하여 22°C~42°C의 온도범위에서 측정하였다. 분산안정성이 열전도도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 제작 직후의 나노유체와 제작 후 추가적으로 초음파 교반기를 이용해 분산안정성을 향상시킨 유체로 구분하여 실험을 진행하였다.

Fig. 5는 초음파 분산을 실시하지 않은 금나노유체의 열전도도 측정 결과이다. 열전도도 측정결과, 기본유체의 열전도도 값과 큰 차이를 보이지 않았으며, 온도에 따라 열전도도 변화가 없었다. 기존의 연구자들은 온도에 따라 열전도도가 달라진다고 보고하였으며, 초음파 교반을 하지 않은 유체는 기존의 연구자들의 결과와 상이한 결과를 나타내었다⁽¹⁴⁾.

Fig. 6은 분산안정성을 향상시키기 위해 추가적으로 초음파 교반을 실시한 나노유체의 열전도도이다. Fig. 6(a)는 약 22°C에서 측정한 열전도도 결과이며, 기본유체의 열전도도와 유사한 값을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 시간에 따라 열전도도값이 변하지 않았는데 이는 측정 초기부터 기본유체의 열전도도값과 유사하기 때문으로 판단된다. Fig. 6(b)는 약 42°C에서 열전도도를 측정한 결과이며 22°C에서 측정한 결과보다 높은 열전도도 값을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 측정 초기 결과는 물

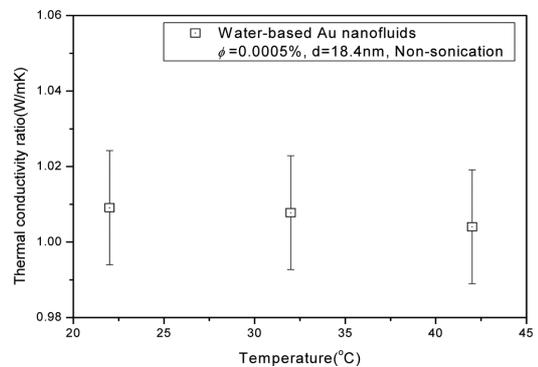


Fig. 5 Thermal conductivity of water-based Au nanofluids (Non-sonication)

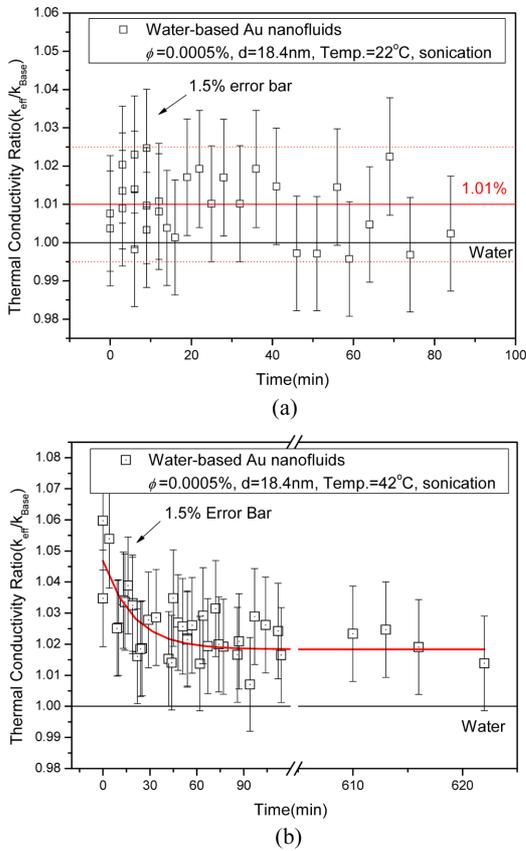


Fig. 6 Thermal conductivity of water-based Au nanofluids as a function of time - (a) 22°C, (b) 42°C

대비 약 6%정도 열전도도가 크게 상승되었으나, 시간이 지남에 따라 열전도도는 감소하는 경향성을 나타내었으며, 이후 약 2%로 수렴하는 결과를 보여주었다.

3.2 분산안정성 측정 결과

본 연구에서 제작된 물-기반 금나노유체의 분산안정성을 평가하기 위하여 Laser scattering 방법을 사용하였으며, 정량적으로 분산안정성을 평가하기 위하여 나노유체의 투과 광량을 분산안정성 열화계수로 나타내었다. Fig. 7의 그래프는 시간 경과에 따른 금나노유체의 분산안정성 결과이며, 시간 경과에 따라 분산안정성은 급격히 감소하는 경향성을 나타내었다. 분산안정성이 감소하는 원인으로, 기존 연구자들이 보고한 바와 같이 유체 내부에서 입자끼리 응집하고 응집된 입자가 침전되는 것으로 판단되며^(15,16), 본 연구에서는 이를 정량적인 지표로 나타내었다. 또한, 입자가 침전되어 나노유체의 농도가 상대적으로 낮아지게 되며 이는 나노유체의

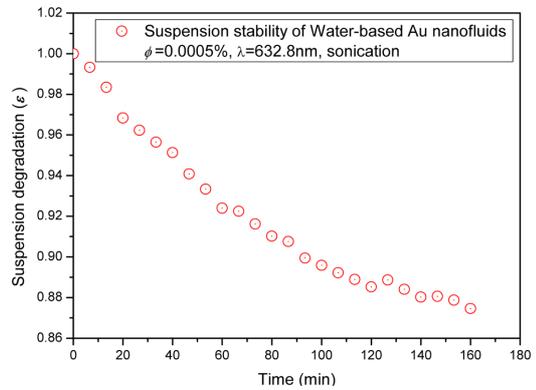


Fig. 7 Suspension degradation factor of the water-based Au nanofluids as a function of time

물성치에 영향을 줄 것으로 판단된다.

따라서, 앞서 언급한 초음파 교반을 수행한 금나노유체의 경우, 42°C에서 초기 열전도도 증가량이 6%에서 시간이 지남에 따라 감소하는 주원인으로 분산안정성이 감소하기 때문으로 사료된다. 또한, 초음파 교반을 수행하여 분산성을 향상시킨 나노유체는 온도변화에 따른 열전도도 변화가 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 분산안정성이 나노유체의 열전도도에 미치는 영향에 대한 연구 수행하였으며, 측정 결과를 바탕으로 분산안정성은 나노유체의 열전도도에 영향을 주는 인자임을 실험적으로 확인하였다. 이를 위해 물-기반 금나노유체를 electro-chemical 방법을 이용하여 제작하였으며, 비정상열선법을 이용하여 열전도도와 Laser Scattering방법을 통해 분산안정성을 측정하였다. 금나노유체의 열전도도는 초음파 분산을 수행한 나노유체가 상대적으로 더 높은 열전도도 값을 갖는 것을 확인하였으며, 고온에서 더 높은 열전도도를 갖는 온도 경향성이 있음을 확인하였다. 또한, 열전도도는 약 60분간 꾸준히 감소하였으며, 1시간 이후에 감소하는 경향성은 없는 것으로 확인하였다. 분산 안정성은 측정 초기부터 꾸준히 감소하였으며 약 1시간 후에는 초기 대비 약 10% 정도 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 분산 안정성이 90% 이상일 때 유체의 열전도도 향상이 있다. 감소 원인으로서는 입자의 응집 및 침전으로 인해 나노유체의 농도가 감소하는 것으로 사료된다. 따라서, 나노유체의 분

산안정성 열화가 나노유체의 농도를 저하시키며 이로 인하여 열전도도가 감소함을 알 수 있다. 따라서 90% 이상의 높은 분산안정성을 가지는 물-기반 금나노유체를 제작할 경우 기존에 사용되고 있는 물이나 에틸렌글리콜과 같은 냉각유체보다 높은 냉각성능을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014R1A2A1A11052109).

참고문헌

- (1) S. U. S. Choi and J. A. Eastman, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", ASME-Publications-FED, Vol. 231, 1995, pp. 99~105.
- (2) S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li and J. A. Eastman, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles", ASME J. Heat Transfer, Vol. 121, 1999, pp. 280~290.
- (3) B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles", Experimental Heat Transfer an International Journal, Vol. 11, 1998, pp. 151~170.
- (4) X. Wang, X. Xu and S. U. S. Choi, "Thermal Conductivity of Nanoparticles-fluid Mixture", J. Thermophys. Heat Transfer, Vol. 13, 1999, pp. 474~480.
- (5) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, G. Soyez, L. J. Thompson and R. J. Dimelfi, "Novel Thermal Properties of Nanostructured Materials", Materials Science Forum, Vol. 312~314, 1999, pp. 629~634.
- (6) S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. Seifjamnani and S. M. Hoseini, "Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃/water nanofluid", Applied Thermal Engineering, Vol. 31, Issue. 10, 2011, pp. 1833~1838.
- (7) S.-H. Lee and S. P. Jang, "Efficiency of a Volumetric Receiver Using Aqueous Suspensions of Multi-Walled Carbon Nanotubes for Absorbing Solar Thermal Energy", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 80, 2015, pp. 58~71.
- (8) H. J. Kim, S.-H. Lee, S. B. Kim and S. P. Jang, "The Effect of Nanoparticle Shape on the Thermal Resistance of a Flat-Plate Heat Pipe Using Acetone-Based Al₂O₃ Nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 92, 2016, pp. 572~577.
- (9) T. Yuamsawasd, A. S. Dalkilic and S. Wongwisesa, "Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids", Thermochim Acta, Vol. 545, 2012, pp. 48~56.
- (10) J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson and S. Lee, "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. In: Proceedings of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II", Boston Vol. 457, 1997, pp. 3~11.
- (11) S. P. Jang and S. U. S. Choi, "Effects of various parameters on nanofluid thermal conductivity", J. Heat Trans. -ASME, Vol. 129, 2007, pp. 617~623.
- (12) S. U. S. Choi, Z. G. Zhang, W. Yu, F. E. Lockwood and E. A. Grulke, "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions", Appl. Phys. Lett., Vol. 79, 2001, pp. 2252~2254.
- (13) C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee and S. U. S. Choi, "Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al₂O₃) Thermal Conductivity Enhancement", Appl. Phys. Lett., Vol. 87, 2005, pp. 153107-1-3.
- (14) J.-H. Lee, S.-H. Lee and S. P. Jang, "Do Temperature and Nanoparticle Size Affect the Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids?", Appl. Phys. Lett., Vol. 104, 2014, pp. 161908.
- (15) M.-S. Liu, M.C.-C. Lin, C. Y. Tsai and C.-C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method", Int. J. Heat Mass Tran., Vol. 49, 2006, pp. 3028~3033.
- (16) K. S. Hong, T.-K. Hong and H.-S. Yanga, "Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles", Appl. Phys. Lett., Vol. 88, 2006, pp. 031901.
- (17) H. J. Kim, S.-H. Lee, J.-H. Lee and S. P. Jang, "Effect of particle shape on suspension stability and thermal conductivities of water-based bohemite alumina nanofluids", Energy, Vol. 90, 2015, pp. 1290~1297.
- (18) W. A. Wakeham, A. Nagashima and J. V. Sengers, "Measurement of the transport properties of fluids", Blackwell Science, 1991, London, Chap. 7.
- (19) R. H. Müller, G. E. Hildebrand, R. Nitzche and B. R. Paulke, "Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis", Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1st Ed., 1996, Stuttgart.