Http://dx/doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.3.537 *ISSN 2233-6036*

시간경과, 교반 및 분산제 첨가에 따른 물-Al_2O_3 나노유체 열전도도 변화에 관한 실험적 연구

박동욱[a], 박창용[a*]

An Experimental Study on Thermal Conductivity Change of Water-Al_2O_3 Nanofluid with the Elapse of Time, Stirring, and Adding Dispersing Agent

Dong-Uk Park[a], Chang Yong Park[a*]

[a] *Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 6 May 2013
Revised 25 May 2013
Accepted 28 May 2013

Keywords:
Water-Al_2O_3
Nanofluid
Thermal conductivity
Elapse of time
Particle size
Concentration
Dispersing agent

ABSTRACT

A water-Al_2O_3 nanofluid was manufactured, and its thermal conductivity was measured in this study. The measurement was performed at volumetric concentrations of 0.5%, 1%, 2%, and 3%, and the nanoparticle sizes were 20 nm and 70 nm. Experimental test equipment, using the transient hot wire method, was installed to measure the thermal conductivity of the nanofluid, and the measured results were confirmed by measuring pure water with a measurement error of 0.92% at 20℃. The thermal conductivity enhancement ranged from 4.8% to 13.6% for the 20 nm particle size, and from 3.1% to 8.8% for the 70 nm particle size at a concentration range of 0.5% to 3%. The enhancement increased with a decrease in particle size and an increase in concentration. With the elapse of time after manufacturing the nanofluid, the thermal conductivity enhancement decreased significantly from 5 to 9 h, and this trend was measured under all of the measurement conditions. After 24 h, the enhancement ranged from 1.2% to 3.5% for the 20 nm particles, and from 0.6% to 2.3% for the 70 nm particles. The enhancement trends with the elapse of time were almost identical with and without stirring the nanofluid. SDBS (Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate) was added as a dispersing agent, and the decrease in the thermal conductivity enhancement was delayed.

1. 서 론

에너지의 절약과 효율적 활용이 전 세계적으로 중요해지면서 에너지관련 장치의 효율향상에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다. 대부분 에너지 시스템은 온도차에 의한 열전달 현상을 기본적으로 포함하고 있으며, 열전달 능력을 향상시키는 것이 결국 장치의 고효율화에 기여하는 경우가 많다. 열전달을 증가시키는 방법에는 여러 가지가 있지만 최근 10여 년 동안 많은 연구자들이 주목하고 있는 방법은 나노입자를 사용하여 작동유체가 갖는 열전도도를 높이는 것이다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6360
Fax: +82-2-974-8270
E-mail address: cypark@seoultech.ac.kr (Chang Yong Park).

액체에 비해 열전도도가 수백 배 우수한 고체를 수십 nm 크기의 분말로 만들어 기본유체(base fluid)와 섞으면 미세한 입자가 기본유체 내부에 고르게 분산되며 기본유체의 열전도도 보다 높은 값을 갖게 된다. 이러한 유체를 나노유체라 한다. Lee et al.[1]의 연구가 발표된 이후 나노유체에 관한 많은 실험적, 이론적 연구가 수행되었고, 이는 Murshed et al.[2], Özerinç et al.[3], 그리고 Vajjha and Das[4]에 의해 체계적으로 요약되어있다. 국내에서도 관련 연구가 진행되어[5,6] 나노유체는 관련 연구자에게 익숙한 용어가 되고 있다. 최근에는 물성측정의 수준을 넘어 나노유체를 실제 시스템에 응용하여 열전달 성능을 향상시켰다는 연구가 발표되고 있다.[7,8]

기존 연구에 사용된 나노입자의 종류는 Al_2O_3, SiO_2, TiO_2, CuO, SiC, CNT 등이 있으며, 각 입자의 종류와 크기, 그리고 농도에 따라 나노유체의 열전도도가 달라진다. 일반적으로 입자의 종류가 작고 농도가 높을수록 기본유체에 대해 열전도도의 향상 정도가 큰 것으로 알려져 있다. 나노입자의 유체내부 분산성을 향상시키기 위해 주로 초음파로 진동을 가하여 나노유체를 제조한다. 일부 연구자들은 물리적으로 단순하게 흔들어 섞어주는 간단한 방법을 사용하기도 하였다.

기존 연구가 갖는 문제점은 같은 종류의 물질, 동일한 입자크기 및 농도 조건에서 각 연구가 보고한 열전도도 향상 정도가 상당히 다르다는 점이다. 심지어 동일한 물질 혼합조건에서, 입자가 큰 경우가 작은 경우에 비해 열전도도 향상의 정도가 크다는 일반적인 이론과 반대가 되는 연구결과도 존재함을 위에서 언급한 review 논문[2,3]에서 확인할 수 있다. 이는 나노입자의 분산성과 그에 따른 열전도도가 기존에 연구된 입자의 종류, 크기 및 농도 이외의 변수에 의해 영향을 받는다는 것을 의미한다. Lee and Kang[6]은 온도가 열전도에 영향을 주는 변수임을 실험적으로 확인하였고, 온도가 증가할수록 열전도도 향상률이 소폭 증가함을 보고하였다.

위에서 언급한 많은 기존연구에도 불구하고 나노유체가 갖는 단점이라 할 수 있는 시간에 따른 분산도의 감소에 관한 정량적인 연구가 부족한 상태이다. 본 연구에서 사용된 Al_2O_3 나노유체의 경우 초음파를 이용한 분산제조 이후 시간의 경과에 따라 나노입자가 바닥에 가라앉는 현상을 확인할 수 있었다. Al_2O_3 나노유체와 관련된 많은 연구들이 초기 열전도도 향상에 관련된 내용을 주로 서술하고 있다. 나노입자의 시간 경과에 따른 분산성 및 열전도도 증가효과의 감소를 예측할 수 있지만, 열전도도 변화를 정량적으로 측정한 연구는 아직 존재하지 않는다.

본 연구는 이러한 연구 배경에서 출발하였다. 응용적 측면에서 볼 때 이러한 열전도도의 향상은 지속성을 가져야 한다. 이를 위해 실제응용을 위한 나노유체에는 분산제를 함께 섞어 제조하고 있지만 이러한 분산제의 실제 효과에 관한 시간 경과에 따른 효과에 관한 연구도 부족하다. 본 연구에서는 20 nm와 70 nm의 크기를 갖는 Al_2O_3 입자를 증류수에 섞어 다양한 농도의 나노유체를 제조하였다. 제조된 나노유체를 정지된 상태로 유지한 후 시간경과에 따른 열전도도 변화를 실험을 통해 측정하고 그 결과를 고찰하였다. 또한 나노유체가 실제 시스템에서 작동하는 경우 지속적인 유동조건에 놓이기 때문에, 이러한 물리적 섞임 현상이 시간경과에 따른 나노유체 열전도도 변화에 미치는 영향을 자력 교반기를 사용하여 실험적으로 고려하였다. 또한 SDBS (Sodium dodecylbenzene sulfonate)를 분산제로 사용한 나노유체의 시간경과에 따른 열전도도 변화를 측정 하고 그 결과를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 나노유체는 증류수를 기본유체로 하여 20 nm와 70 nm의 크기를 갖는 Al_2O_3 입자를 섞어 제조하였다. 각 입자의 크기는 제조사(20 nm는 US Research Nanomaterial, Inc., 70 nm는 ㈜나노기술)가 제시한 평균 입자크기를 사용하였고, 입자 밀도는 3.6 g/mm^3, 입자의 형태는 구형이었다. 기존의 연구[2,3]을 살펴보면 나노유체 제조에 사용되는 Al_2O_3 입자의 크기는 13~80 nm 정도이며, 대부분의 연구는 40 nm 이하의 크기가 적용되었다. 본 연구에서는 20 nm와 70 nm 크기의 입자를 연구 대상으로 선정하였다. 20 nm Al_2O_3 입자는 구입 가능한 가장 작은 크기의 입자였으며, 70 nm 입자의 경우 크기에 따른 열전도도 변화의 비교가 적합하다고 판단되어 연구대상으로 선택하였다.

제조를 위해 증류수에 정해진 체적 비율의 나노입자를 넣고 약 3시간동안 초음파 진동을 가하였다. 증류수와 Al_2O_3 나노유체만의 시간경과 시 열전도도 변화를 파악하기 위해 분산제는 첨가하지 않았다. 나노유체의 부피농도(ϕ)는 아래의 식 (1)과 같이 정의되며 이를 이용하여 기본유체와 나노입자의 질량을 결정할 수 있다.

$$\phi = \frac{V_P}{V_{BF}} = \frac{(m_P/\rho_P)}{(m_{BF}/\rho_{BF})} \tag{1}$$

여기서 V는 부피, m은 질량, ρ는 밀도, 하첨자 P은 나노입자, 하첨자 BF는 기본유체를 각각 의미한다.

유체의 열전도도의 측정은 대부분 비정상열선법을 사용하여 측정한다. 비정상열선법은 측정하고자 하는 유체에 잠겨있는 열선이 방출하는 모든 열이 주변의 액체로 전도에 의해서만 전달되며 주변 액체의 물성값이 일정하다고 가정한다. 발열하는 열선의 시간에 대한 온도변화율은 주변 유체의 열전도도에 따라 달라진다. 만일 열전도도가 높은 유체의 경우 열선에서 열을 빨리 제거하므로 시간에 대한 온도변화율은 작아지게 되는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 열선의 단위길이 당 발열량(q/L)과 측정시간 동안의 대수 시간차에

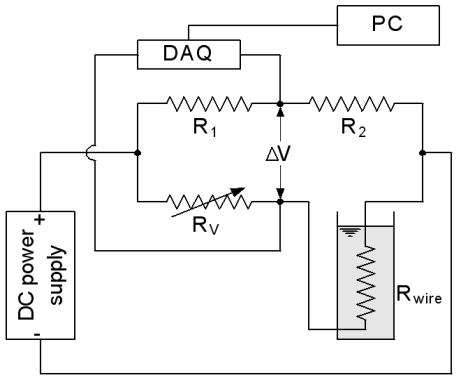


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

대한 열선의 온도(T_{wire})차를 사용하면, 식 (2)에서와 같은 표현으로 유체의 열전도도(k)를 구할 수 있다. 식 (2)의 유도에 대한 수학적 과정과 측정방법에 관한 구체적 내용은 Lee and Kang[6]과 Murshed et al.[9]의 연구에 잘 나타나 있다.

식 (2)를 이용하여 유체의 열전도도(k)를 구하기 위해 Fig. 1과 같이 유체에 잠긴 열선을 포함한 회로를 구성하게 되는데, 이때 열선에 작용하는 저항을 정밀하게 측정하기 위해 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)를 이용한다. 열선에 작용하는 저항을 측정하는 이유는 식 (2)의 열선온도(T_{wire})가 열선의 저항(R_{wire})과 온도의 관계를 표현하는 식 (3)을 통해 구해질 수 있기 때문이다.

$$k=\left(\frac{1}{4\pi}\frac{q}{L}\right)/\left(\frac{T_{wire,t_2}-T_{wire,t_1}}{\ln t_2-\ln t_1}\right) \tag{2}$$

$$R_{wire}=R_0[1+\alpha(T_{wire}-T_0)] \tag{3}$$

여기서 R_0는 기준온도 T_0에서 열선의 저항이며 α는 저항온도계수(temperature coefficient of resistance)로 본 실험장치에서 백금을 사용하였으므로 20℃에서 0.00392/℃의 고유값을 갖는다. Fig. 1에서 R_1과 R_2는 100 kΩ의 고정저항, R_V는 가변저항, R_{wire}는 열선저항이다. 열선은 백금이며 길이 0.2 m, 지름 25 μm의 원통형이다. 전압차(ΔV)는 National Instrument 사의 DAQ (모델명 NI9201)를 사용하여 초 당 20회의 데이터를 수집하였다. R_{wire}는 측정된 전압차(ΔV)에 의해 식 (4)를 통해 구할 수 있다. 식 (4)에서 V_0는 직류전원 공급장치를 이용하여 가해지는 기전력을 의미한다.

$$R_{wire}=R_V\left[1/\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}-\frac{\Delta V}{V_0}\right)-1\right] \tag{4}$$

유체의 열전도도 측정과정을 요약하면 다음과 같다. Fig. 1의 장치를 통해 시간의 변화에 따른 전압차의 변화를 측정한 후, 식 (4)를 통해 열선저항의 변화를 구한다. 식 (3)을 이용하여 열선의 온도 변화를 구한 뒤, 식 (2)의 시간과 온도 변화관계의 선형구간 기울기를 구하면 유체의 열전도도를 구할 수 있다.

나노유체를 실제 시스템에 이용하는 경우 대부분 시스템 내부에서 지속적으로 유동하는 조건에서 사용되는 경우가 많다. 따라서 유동이 없이 정지하는 상태로 시간경과에 대한 열전도도의 변화를 측정하는 것이 실제 나노유체 응용조건과 다르게 생각될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지속적인 유동에 있는 나노유체를 모사하고자 나노유체에 자력 교반기를 사용하여 실험시간 동안 지속적으로 물리적인 교반 효과를 가하였다. 이를 통해 정지 상태에서 시간이 경과하는 경우와 유동이 존재하는 경우 나노유체의 시간경과에 따른 열전도도 변화를 측정하였다. 추가적으로 물-Al_2O_3 나노유체의 분산성 향상을 위해 SDBS를 사용하는 기존연구[10]를 참고하여 SDBS를 질량비 0.5% 첨가하였고 이를 통해 시간에 따른 열전도도 변화를 측정하였다.

3. 관련이론 요약

나노유체의 열전도도는 입자의 종류와 크기, 혼합농도 그리고 온도에 따라 그 값이 다르다. 일반적으로 입자의 크기가 작고 농도가 높을수록 기본유체에 대한 열전도도 향상률이 큰 것으로 알려져 있다.

나노유체의 열전도도 측정에 관한 비교적 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 나노유체의 열전도도를 정확하게 예측할 수 있는 식은 아직 발표되지 않았다. 그 이유는 나노입자가 기본유체의 열전도도를 향상시키는 물리적 메커니즘에 관한 모델이 아직 확립되지 않았기 때문이다. 이러한 현상을 설명하기 위해 다양한 모델이 제시되었으며, Özerinç et al. (3)은 지금까지 발표된 나노유체 열전도도 향상에 관한 모델 중 5가지 모델(나노입자의 브라운 운동모델, 나노입자의 군집모델, 나노입자 주변 액체 막 모델, 나노입자의 포논 충격량 전달모델, 그리고 근접장 복사모델)에 대해 요약하여 설명하였다.

본 연구에서는 고체와 액체의 혼합물에 관한 열전도도 예측을 위해, 고전식인 Hamilton and Crosser[11]의 상관식과, 나노입자의 브라운 운동모델에 근거한 Koo and Kleinsteuer[12] 그리고 Corcione et al.[13]의 상관식을 사용하여 그 값을 계산하고, 실험결과와의 비교를 통해 실험결과의 타당성 검증과 분석을 실시하였다. 모든 상관식은 나노입자가 고르게 분산된 경우에 관한 식이며, 시간의 경과에 따른 분산성 및 열전도도 감소를 계산하는 식이나 이에 관련된 연구는 아직 발표되지 않았다.

식 (5)는 Hamilton and Crosser[11]이 제시한 식을 보여준다.

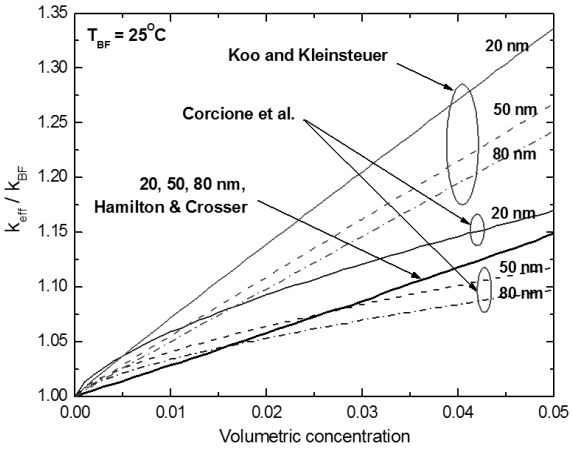


Fig. 2 Variation of Al_2O_3 nanofluid (k_{eff}/k_{BF}) with the change of volumetric concentration for different particle sizes

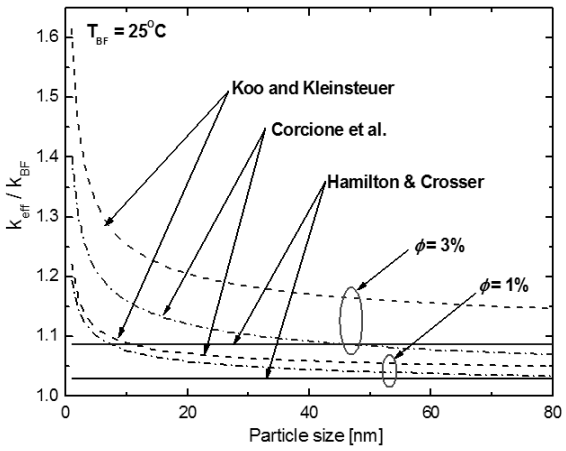


Fig. 3 Variation of Al_2O_3 nanofluid (k_{eff}/k_{BF}) with the change of particle size

$$k_{eff} = \frac{\begin{bmatrix} k_P + (n-1)k_{BF} \\ -(n-1)\phi(k_{BF} - k_P) \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} k_P + (n-1)k_{BF} \\ +\phi(k_{BF} - k_P) \end{bmatrix}} k_{BF} \tag{5}$$

식 (5)에서 k_{eff}는 나노유체의 유효 열전도도, k_P는 나노입자의 열전도도, k_{BF}는 기본유체의 열전도도, ϕ는 부피농도, 그리고 n은 나노입자의 형상계수로 본 연구에서는 구형 입자를 사용하였으므로 3이다. Koo and Kleinsteuer[12]가 제시한 식은 (6) ~ (9)와 같다.

$$k_{eff} = k_{static} + k_{Brownian} \tag{6}$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_{BF} C_{P,BF} f \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_P D_P}} \tag{7}$$

$$\beta = 0.0017(100\phi)^{-0.0841} \tag{8}$$

$$f = (-134.63 + 1722.3\phi) + (0.4705 - 6.04\phi)\,T \tag{9}$$

식 (6)에서 k_{static}은 식 (5)에서 구형입자에 관한 식이고, C_P는 정압비열, k_B는 Boltzmann 상수(1.0807×10^{-23} J/K), T는 나노유체의 Kelvin 온도, 그리고 D_P는 나노입자의 지름이다. Corcione et al. (13)가 제시한 식은 (10)과 (11)이다.

$$\frac{k_{eff}}{k_{BF}} = 1 + 4.4 \left(\frac{2\rho_{BF} k_B T}{\pi \mu_{BF}^2 D_P} \right) \mathrm{Pr}_{BF}^{0.66} C_1 \tag{10}$$

$$C_1 = \phi^{0.66} \left(\frac{T}{T_{FR}} \right)^{10} \left(\frac{k_P}{k_{BF}} \right)^{0.03}$$

식 (10)에서 μ는 동점성 계수, Pr은 Prandtl 수, 그리고 T_{FR}은 기본유체 어는점의 Kelvin 온도를 의미한다.

Figs. 2와 3은 위에서 제시한 3가지 상관식을 이용하여 계산한 Al_2O_3 나노유체와 기본유체의 열전도도 비(k_{eff}/k_{BF})가 농도와 입자 크기에 따라 어떻게 변화하는가를 보여준다. Fig. 2에서 나노유체의 열전도도는 나노유체의 농도증가에 따라 상승하고 있음을 보여준다. 하지만(k_{eff}/k_{BF})는 적용된 상관식에 따라 큰 차이가 있음을 보여준다. Hamilton and Crosser[11]의 상관식과 Koo and Kleinsteuer[12] 상관식은 농도의 증가에 따라 선형적인(k_{eff}/k_{BF}) 증가를 보여주고 있으며,

Corcione et al.[13]의 상관식의 경우 농도의 증가에 따라 그 증가율이 조금씩 감소하는 경향을 보여준다. 입자의 크기가 감소함에 따라(k_{eff}/k_{BF})가 증가하고 있음을 알 수 있으며, Hamilton and Crosser[11]의 상관식은 식 (5)에서 보여준 것과 같이 입자의 크기를 고려하지 않아 모든 입자 크기에 대하여 동일한 (k_{eff}/k_{BF})을 예측하고 있어, Hamilton and Crosser[11] 모델이 나노유체의 (k_{eff}/k_{BF})값을 예측하는데 한계가 있음을 알 수 있다. 동일한 농도와 입자의 크기에 대하여 Corcione et al.[13]의 상관식과 Koo and Kleinsteuer[12] 상관식은 크게는 2배 정도의 예측결과 차이를 보여주고 있으며, 이를 통해 나노유체의 (k_{eff}/k_{BF})값 예측은 상관식에 따라 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 나노입자의 크기에 따른 (k_{eff}/k_{BF})값의 변화를 좀 더 구체적으로 보여주고 있다. 전술한 것과 같이 Hamilton and Crosser[11]의 상관식은 입자의 크기에 관계없이 동일한 값을 보여주며, 이는 실제 많은 연구결과와 불일치한다. 대부분의 연구는 입자의 크기가 작을수록 (k_{eff}/k_{BF})이 증가함을 보여주며 이러한 경향성은 나머지 두 식에 의해 예측될 수 있음을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Al_2O_3 나노유체 열전도도 측정

위의 2장에서 언급하였던 실험장치와 방법을 사용하여 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 장치의 정확성을 확인하기 위하여 증류수를 이용하여 순수한 물의 열전도도를 실험으로 측정한 후 알려진 값과 비교하였다. Table 1은 측정결과와 이론값을 비교한 값이다. 측정은 20℃ 조건에서 이루어졌으며 4회 실험을 실시한 후 평균값을 이용하여 최종 값으로 선정하였다. 각 1회 실험 결과값은 거의 유사한 값을 가졌다. 비교 결과 본 장치의 측정결과와 이론값의 오차는 0.92%로 1% 이내의 오차를 보였다. 이를 통해 본 연구에서 사용된 실험장치가 비교적 정확하게 액체의 열전도도를 측정할 수 있음을 확인하였다.

나노유체의 제조를 위해 크기가 20 nm와 70 nm인 구형 Al_2O_3 나노입자를 사용하였으며, 증류수와 부피농도가 각각 0.5%, 1%, 2%, 3%가 되도록 하였다. 따라서 총 8가지 종류의 나노유체가 제조되었다. 각 나노유체의 제조직후 전도도를 측정하여 기본유체와의 비율을 계산한 후 기존의 식과 비교한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 부피농도가 0.5%와 1%인 조건에서 나노유체의 열전도도 향상은 Koo and Kleinsteuer[12] 상관식이 예측한 결과와 유사하며, 2%와 3% 조건에서는 Corcione et al.[13]의 상관식과 예측과 Koo and Kleinsteuer[12] 상관식 결과 사이에 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 측정한 나노유체의 열전도도 향상 값은 기존에 발표한 이론과 근사한 측정결과를 보여준다.

Table 1 Comparison of measured and theoretical thermal conductivity for pure water at 20℃

	Measurement	Theory	Error
kwater (W/m·k)	0.5915	0.5861	0.92%

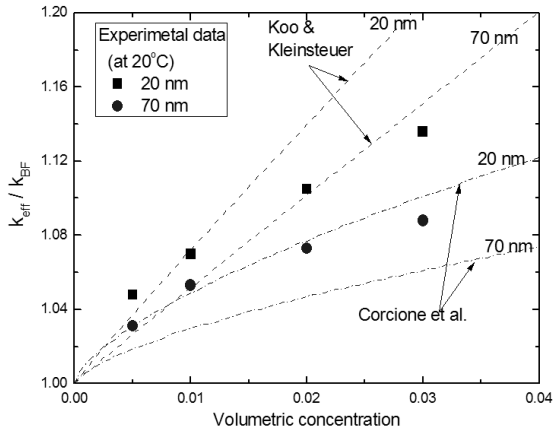


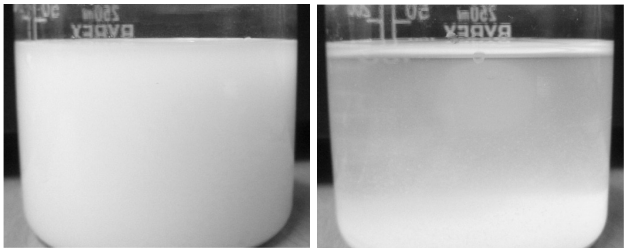
Fig. 4 Comparison between measurement and predictions

4.2 시간경과에 따른 나노유체 열전도도 변화

지금까지 대부분의 연구는 나노유체의 열전도도 향상과 이를 응용하는 경우가 대부분이다. 하지만, 나노유체가 갖는 단점 중 하나는 시간의 경과에 따른 분산성의 감소로 인해 침전이 생기면서 열전도도 향상효과가 감소한다는 점이다.[5] 따라서 본 절에서는 시간의 경과에 따라 나노유체의 열전도도가 어떻게 변화하는가에 관한 정량적 실험결과를 제공하고자 한다. 이러한 결과는 추후 분산제 투입이나, 분산성 향상을 위한 방법이 제시되는 경우 분산성 유지를 판단하는 비교 데이터로 그 가치가 있다고 할 수 있다. 분산성 자체를 측정하는 방법으로는 액체의 zeta potential 측정 등이 있으나 본 연구에서는 분산성 자체를 위한 추가적인 측정은 수행하지 않았다.

Fig. 5는 크기 70 nm의 Al_2O_3 입자가 증류수에 농도 2%로 섞여 나노유체를 만든 직후와 고정된 상태로 9시간이 경과한 후 나노유체의 사진을 보여주고 있다. 사진을 통해 시간의 경과 후 나노입자가 바닥부에 침전되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 다양한 농도에서 20 nm 입자와 70 nm 입자를 이용한 Al_2O_3 나노유체의 시간경과에 따른 (k_{eff}/k_{BF})값 변화를 보여준다. 일반적으로 입자가 작을수록 분산성이 더 우수한 것으로



(a) After 0 hour (b) After 9 hours

Fig. 5 Picturers of Al_2O_3 nanofluid (Dp = 70 nm, ϕ = 2%) with the elapse of time after ultrasonic dispersion

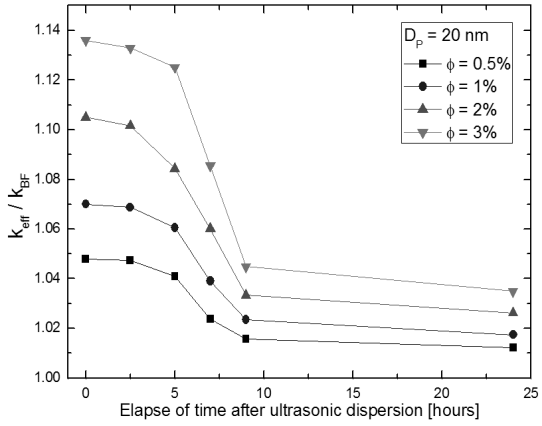


Fig. 6 Variation of (k_{eff}/k_{BF}) with elapse of time and concentration for 20 nm particle size at 20℃

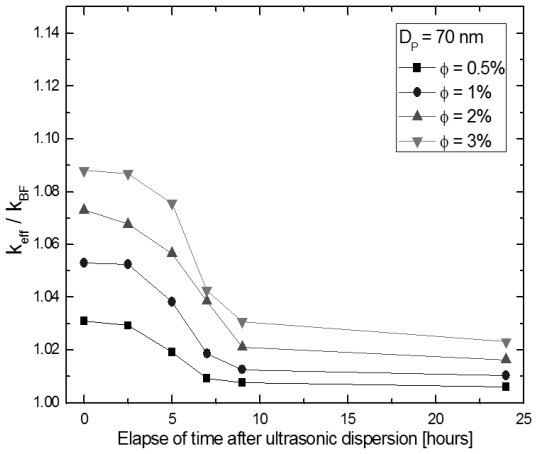


Fig. 7 Variation of (k_{eff}/k_{BF}) with elapse of time and concentration for 70 nm particle size at 20℃

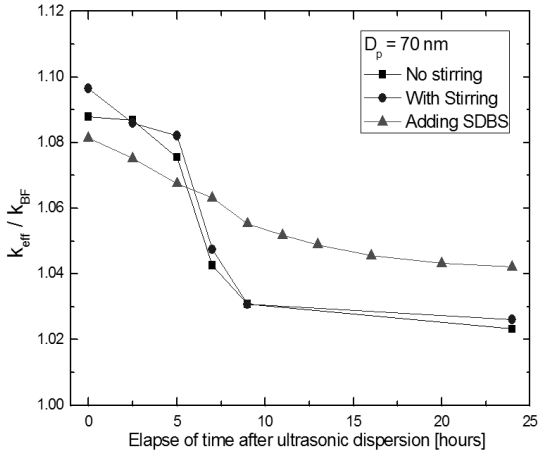


Fig. 8 Variation of (k_{eff}/k_{BF}) with elapse of time with and without stirring, and adding SDBS (70 nm particle size at 20℃)

알려져 있으나 본 연구의 결과는 20 nm와 70 nm 입자의 나노유체 모두 5시간 경과부터 분산성과 열전도도 향상 이 급격하게 감소하기 시작하여 9시간 정도 지난 후에는 (k_{eff}/k_{BF})이 낮은 값을 갖는 상태로 완만한 기울기를 가지며 감소함을 보여준다. 24시간 경과까지 지속적인 감소를 보여주기 때문에 그 이후로 시간이 경과하여도 천천히 감소하는 경향을 보일 것으로 예측된다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 주목할 점은 두 입자크기 종류에 대해 감소의 경향은 비슷하지만, 동일한 시간에서 입자와 농도의 효과를 고려할 때 입자의 크기가 작고 농도가 높을수록 더 높은 열전도도를 갖는다는 점이다. 또한 24시간 경과 후에도 분산제 투입이 없이 순수한 물과 비교하여 농도 3%에서 20 nm의 경우 3.5%, 70 nm의 경우 2.3% 정도의 열전도도 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 교반 및 분산제 첨가에 따른 나노유체 열전도도 변화

실험에서 추가적으로 수행된 측정은 물리적 혼합을 통한 열전도도의 변화여부였다. 실제 응용되는 나노유체의 흐름을 모사하기 위해 자력 교반기를 사용하여 지속적으로 70 nm 크기의 나노입자가 3% 농도로 혼합된 나노유체를 섞어주었고 시간에 따른 열전도도 변화 측정결과가 Fig. 8에 제시되었다. Fig. 8은 교반을 시킨 나노유체의 시간 경과에 따른 (k_{eff}/k_{BF})의 변화가 정지한 상태와 비교하여 볼 때 거의 차이가 없다는 것을 보여주고 있다. 따라서 이전에 언급한 나노유체 열전도도의 감소는 유체가 정지해 있거나 혹은 유동하고 있을 때 모두 공통적으로 나타나는 현상이라 생각된다. 물리적으로 교반시킨 나노유체는 육안으로 볼 때 분산되어 있는 것처럼 보이지만 측정을 위해 교반을 멈추면 바닥에 나노입자가 침전되어 있었다. 다시 말하면 물리적인 유동이나 섞임을 통한 (k_{eff}/k_{BF}) 감소완화를 기대하기 어려우며, (k_{eff}/k_{BF}) 감소를 막기 위해서는 초음파를 이용한 분자의 활성화나 화학적인 분산제를 투여하여 입자의 분산성을 좋게 하는 것이 현실적인 방법임을 알 수 있다.

본 연구에서는 물리적 방법으로 (k_{eff}/k_{BF})의 감소를 막기 어렵다는 것을 확인한 후, 열전도도 향상 효과의 유지를 위해 분산제인 SDBS를 투입하였고, 시간경과에 따른 열전도도 변화를 측정하였으며, Fig. 8에 그 결과가 제시되어 있다. 약 0.5%의 질량비로 첨가된 SDBS는 나노유체가 응집되는 현상을 막아주어 침전을 방지하는 기능을 하게 되고 그 결과 열전도도의 감소를 막는 것으로 알려져 있다. Fig. 8에서 보여주는 것과 같이 SDBS는 분산제가 투입되지 않은 물-Al_2O_3 나노유체가 보여주는 급격한 (k_{eff}/k_{BF}) 감소가 나타나지 않는다. 특히 분산제가 투입되지 않았던 5~9 시간 이후에 발생하였던 급격한 (k_{eff}/k_{BF})의 감소가 발생하지 않고, 완만한 기울기를 가지며 그 값이 감소함을 할 수 있다.

추가적으로 주목할 점은 처음 나노유체를 제조한 시점을 기준을 하는 경우 초기 5시간 동안 (k_{eff}/k_{BF})값은 SDBS를 투입하지 않는 경우보다 약간 작은 값을 보이고 있다는 것이다. 이러한 영향은 Zhu et al.[10]가 언급한 것과 같이 SDBS의 농도가 분산성과 관련있는 액체의 zeta potential을 변화시키기 때문이다. Zhu et al.[10]는 나노유체의 열전도도가 나노입자의 농도뿐 아니라 분산제의 농도와도 관련이 되어 있다고 보고하였다. 분산제를 첨가한다고 하여 분산성이 완전히 유지되고 (k_{eff}/k_{BF})가 일정하게 유지되는 것은 아니지만, (k_{eff}/k_{BF}) 값의 감소경향이 분명하게 지체되는 것을 Fig. 8은 보여주고 있다.

5. 요약 및 결론

20 nm와 70 nm의 입자크기를 갖는 Al_2O_3 나노유체의 열전도

도를 측정하고 기본유체의 열전도도와 비교하여 (k_{eff}/k_{BF})을 부피농도 0.5%, 1%, 2%, 그리고 3%에서 각각 구하였다. 또한 나노유체 제조이후 시간의 경과에 따른 (k_{eff}/k_{BF}) 변화를 측정하였다. (k_{eff}/k_{BF})를 예측하는 다양한 상관식은 서로의 예측값이 다르므로, 나노유체의 열전도도 향상을 예측하기 위한 정확한 모델이 개발되어야 함을 알 수 있었다. 순수한 물을 이용하여 실험장치를 검증하였으며 그 오차는 0.92% 였다. 나노유체 제조 직후 측정된 (k_{eff}/k_{BF})값은 다양한 상관식이 예측하는 범위 안에 대부분 존재하였다. 시간의 경과에 따른 침전을 확인하였으며, 이러한 분산성 감소를 통한 (k_{eff}/k_{BF}) 감소는 5~9 경과시간 사이에 가장 급격하게 발생하였다. 하지만 24시간이 경과된 이후에도 나노유체에 의한 열전도도 향상의 영향은 남아있었으며 이러한 영향은 농도가 높고, 입자의 크기가 작을수록 컸다. 자력 교반기를 이용한 물리적인 혼합이 (k_{eff}/k_{BF})에 미치는 영향을 실험으로 측정한 결과 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 (k_{eff}/k_{BF})를 시간경과 후 유지하기 위해서는 초음파와 같은 지속적인 분자수준의 진동을 가하거나 분산제의 투입이 필수적임을 알 수 있다. 분산제로 SDBS를 첨가하는 경우 5시간 동안 (k_{eff}/k_{BF})값은 분산제가 없는 나노유체에 비해 약간 작은 값을 가졌으며, 급격한 (k_{eff}/k_{BF})감소가 나타나지 않고, 시간경과에 따른 (k_{eff}/k_{BF}) 완만한 감소 경향이 나타났다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 기본연구지원사업(2010-0012022)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., Eastman, J. A., 1999, Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles, ASME J. Heat Transfer 121 280-289.

[2] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C., 2008, Review: Thermophysical and Electrokinetic Properties of Nanofluids – A Critical Review, Applied Thermal Engineering 28 2109-2125.

[3] Özerinç, S., Kakaç, S., Yazicioğlu, A. G., 2010, Enhancement Thermal Conductivity of Nanofluids: A State-of-art Review, Microfluid Nanofluid 8 145-170.

[4] Vajjha, R. S., Das D., K., 2012, A Review and Analysis on Influence of Temperature and Concentration of Nanofluids on Thermophysical Properties, Heat Transfer and Pumping Power, Int. J. Heat Mass Transfer 55 4063-4078.

[5] Kim, S. H., Choi, S. R., Hong, J., Kim, D., 2005, Measurement of the Thermal Conductivity of Alumina/ Zinc-Oxide/Titanium-Oxide Nanofluids, Trans. of KSME, Series B 29 1065-1073.

[6] Lee, S., Kang, K., 2007, Validation Test for Transient Hot-wire Method to Evaluate the Temperature Dependence of Nanofluids, Trans. of KSME, Series B 31 341-348.

[7] Ho, C. J., Chen W. C., 2013, An Experimental Study on Thermal Performance of Al2O3/water Nanofluid in a Minichannel Heat Sink, Applied Thermal Engineering 50 516-522.

[8] Kabeel, A. E., El Maarty, T. A., El Samadony, Y., 2013, The Effect of Using Nano-particles on Corrugate Plate Heat Exchanger Performance, Applied Thermal Engineering 52 221-229.

[9] Murshed, S. M. S., Leong, K. C., Yang, C., 2005, Enhanced Thermal Conductivity of TiO2-Water Based Fluid, Int. J. Thermal Science 44 367-373.

[10] Zhu, D., Li, X., Wang, N., Wang, X., Gao, J., Li, H., 2009, Dispersion Behavior and Thermal Conductivity Characteristics of Al2O3-H2O nanofluids, Current Applied Physics 9 131-139.

[11] Hamilton, R. L., Crosser, O. K., 1962, Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems, Industrial Eng. Chemistry Fundamentals 1 187-191.

[12] Koo, J., Kaleinstreuer, C., 2004, A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids, J. Nanoparticle Research 6 577-588.

[13] Corcione, M., Cianfrini, M., Quintino, A., 2013, Optimization of Laminar Pipe Flow Using Nanoparticle Liquid Suspension for Cooling Applications, Applied Thermal Eng. 50 857-867.