

층류유동 조건에서 SiO₂ 나노유체의 대류 열전달 특성에 대한 연구

박현아^{1,2}, 박지현^{1,3}, 정락교¹, 강석원^{1,2*}

¹한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

²과학기술연합대학원대학교 에너지환경융합공학과

³성균관대학교 화학공학과

Investigation of Convective Heat Transfer Characteristics of Aqueous SiO₂ Nanofluids under Laminar Flow Conditions

Hyun-Ah Park^{1,2}, Ji-Hyun Park^{1,3}, Rag-Gyo Jeong¹, Seok-Won Kang^{1,2*}

¹Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute

²Department of Energy and Environmental Engineering, University of Science & Technology

³School of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University

요약 본 연구에서는 벽면으로부터 균일한 열 유속 조건에서 나노유체의 층류유동에 의한 대류 열전달 향상과 관련하여 유동관 내 벽면에서의 나노입자 거동의 영향에 대한 수치해석 및 실험 연구에 대해서 논한다. SiO₂ 나노유체의 동적 열전도도는 스테인리스 원형 관(길이 1 m 및 직경 1.75 mm)의 외면에 부착된 T형 열전대를 활용하여 측정하였다. 실험에 사용된 나노유체는 직경이 24 nm인 구형의 SiO₂ 나노 입자를 초순수에 분산시켜 제조하였다. 나노 유체의 향상된 열전도도(즉, 최대 7.9 %의 증가)는 기본유체(즉, 초순수)와 나노유체 간 유동에서 벽면 온도 변화를 측정하여 비교함으로써 확인하였다. 하지만, 수치해석 결과에서는 실험으로부터 발견된 경향이 발견되지 못했는데, 이는 수치해석 모델이 기본적으로 연속체역학 및 안정된 콜로이드 용액에 나노 입자를 포함하는 유동특성에 기반을 두기 때문으로 분석된다. 이에 따라, 열교환 표면에서 나노 입자와 벽면 간 상호작용(예: 나노입자의 고립된 침전)에 의한 표면특성 변화와 같은 비연속체역학 기반의 효과를 확인하기 위하여, 나노유체의 흐름 직후 정제수를 활용한 추가실험을 수행하였다.

Abstract The effect of the migration of nanoparticles near the wall of a channel on the convective heat transfer in a laminar flow of SiO₂ nanoparticle suspensions (nanofluids) under constant wall heat flux boundary conditions was numerically and experimentally investigated in this study. The dynamic thermal conductivity of the aqueous SiO₂ nanofluids was measured using T-type thermocouples attached to the outer surface of a stainless steel circular tube (with a length of 1 m and diameter of 1.75 mm). The nanofluids used in this study were synthesized by dispersing SiO₂ spherical nanoparticles with a diameter of 24 nm in de-ionized water (DIW). The enhancement of the thermal conductivity of the nanofluids (e.g., an increase of up to 7.9 %) was demonstrated by comparing the temperature profiles in the flow of the nanofluids with that in the flow of the basefluids (i.e., DIW). However, this trend was not demonstrated in the computational analysis, because the numerical models were based on continuum assumptions and flow features involving nanoparticles in a stable colloidal solution. Thus, to explore the non-continuum effects, such as the modification of the morphology caused by nanoparticle-wall interactions on the heat exchanging surfaces (e.g., the isolated and dispersed precipitation of the nanoparticles), additional experiments were performed using DIW right after the measurements using the nanofluids.

Keywords : Dynamic thermal conductivity, Heat transfer, Laminar flow, Nanofluids, Nanoparticles

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Seok-Won Kang(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5673 email: swkang@krii.re.kr

Received August 3, 2016

Revised August 25, 2016

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

1. 서론

나노유체(Nanofluids)란 나노크기의 입자(Nanoparticles, 직경 100 nm 이하)를 물, 오일, 에틸렌글리콜(Ethylene glycol)과 같은 기본유체(Basefluid)에 매우 낮은 입자농도(예: 일반적으로 5 vol. \% 이하)로 분산시킨 2상(Two phase) 유체를 의미한다. Masuda[1]에 의해 처음으로 열전달 성능 개선을 목적으로 연구가 진행된 이후 여러 연구자에 의해 열-물리적 성질 (Thermo-physical properties)의 개선에 대한 잠재적인 가능성이 확인됨에 따라 수많은 후속연구가 진행되었다[2-4]. 나노유체를 제조(Synthesis)하는 방법으로써 ‘One step method’는 기본유체에서 나노입자를 화학적 방법으로 합성하는 방법이며, ‘Two step method’는 이미 만들어진 나노입자를 기본유체에 분산시키는 방법이다. ‘Two step method’는 저렴하다는 장점이 있지만 다소 분산도(Dispersibility)가 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 계면활성제(Surfactant)의 첨가, 초음파분해(Sonication), 및 pH 조절 등을 통하여 분산도를 높이고자 노력하고 있다.

기본적으로 나노유체 연구에서는 부피농도(Volumetric concentration), 온도, 기본유체의 종류, 입자의 모양 및 크기 등을 변화시키며, 열전도도에 영향을 미치는 주요 인자를 확인하기 위해 실험적 측정 또는 수치해석을 진행해왔다. 실험적 측정의 경우 대부분 비정상 열 선법(Transient hot wire method) 방식에 기반을 두어 나노유체의 정적 열전도도를 측정하여 분석하였다. Masuda는 물을 기본유체로 $\text{Al}_2\text{O}_3(13\text{ nm})$, $\text{SiO}_2(12\text{ nm})$, $\text{TiO}_2(27\text{ nm})$ 나노입자를 이용하여 부피농도(Volume fraction)와 온도 범위를 바꾸며 열전도도(Thermal conductivity)를 측정했으며, 그 결과 부피농도의 증가와 온도의 감소에 따라 열전도도는 향상됨이 확인되었다[1].

또한, Kwon과 Kim에 의해 층류 유동조건에서 나노유체의 유동에 대한 연구가 진행되었다. Kwon은 나노유체를 사용하여 압력강하 및 대류 열전달계수를 실험적으로 측정하였으며, 그 결과 Re 수(Reynolds number)가 2000을 넘어가는 구간부터 급격한 대류 열전달계수가 증가함을 확인하였다[5]. Kim은 Al_2O_3 나노유체를 이용하여 질량농도 및 유속의 변화에 따른 열전달 특성을 연구했으며, 6 wt. \% 이고 Re 수가 1100 ~ 1300의 범위에서 열전달 계수가 증류수보다 큰 폭으로 증가함을 보였다

[6]. 이후에도 열전도도 향상에 대한 다양한 연구결과가 공개되었으며, Yu-Hua의 연구 결과에 따르면 온도가 증가함에 따라 브라운 운동(Brownian Motion)의 영향이 커지기 때문에 열전도도가 증가한다는 사실이 밝혀졌다 [7]. 이 외에도 물 기반의 $\text{CuO}(29\text{ nm})$ 와 $\text{Al}_2\text{O}_3(39\text{ nm})$ 나노유체를 이용하여 열전도도를 측정한 Li의 실험에서는 온도가 상승함에 따라 열전도도가 증가하지만, 온도 보다는 부피농도에 영향을 더 크게 받는 것으로 관측되었다[8].

이와 더불어 Chopkar와 Xie는 나노입자의 특성에 따른 열전달 특성에 대해 보고하였다. 우선, Chopkar는 분산되는 나노입자의 크기와 관련하여 입자의 크기가 작을수록 열전도도가 향상됨을 확인하였다[9]. 또한, Xie는 입자의 형상과 크기의 영향에 대해서 연구를 수행하였으며, 원통형(Cylinder) 입자가 분산된 나노유체가 구형(Sphere)입자일 때보다 더 높은 열전도도를 나타냄을 실험적으로 확인하였고 이 결과는 Hamilton and Crosser 모델과 비교되었다[10].

앞서 언급된 연구결과와 같이 주변 환경인자 혹은 나노입자 특성에 따른 나노유체 자체의 열전도도의 경향성을 파악하는 연구는 많이 진행됐다. 하지만, 나노유체의 동적흐름에서 입자의 미시적인 움직임과 유동관과의 상호작용에 따른 열전달 성능평가에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 나노유체의 열전도도 향상에 영향을 미치는 것으로 알려진 여러 시험조건(온도, 유량 등) 외에 입자의 유동관 내에서의 동적 거동에 의한 열전달 특성에 관해서 기술하고자 한다. 이를 위해 수치해석과 실험을 병행하였고, 두 결과를 상호 비교함으로써 나노유체 고유의 열전도도(즉, 정적 열전도도)의 영향뿐만 아니라 유동에서의 입자의 미시적인 거동 때문에 나타나는 대류 열전달 특성이 전체 유효 열전도도(즉, 동적 열전도도)에 어떤 메커니즘에 의해 영향을 미치는 지에 대해서 분석하였다.

2. 실험 준비 및 방법

2.1 SiO_2 나노유체의 합성

실험에서 사용된 $\text{SiO}_2\ 1\text{ vol. \%}$ 나노유체는 초순수(Deionized water, DIW)를 기본 유체로 하여 앞 절에서 언급된 ‘two-step method’를 이용해 SiO_2 나노유체(입자

평균직경: 24 nm, 입자농도: 40 wt.%, Sigma-Aldrich)를 희석해 합성하였다. 분산도의 향상을 위해 유동시험 전 대략 3시간 동안 초음파분해(Ultra-sonication, Branson 5800)을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 기본유체 및 나노유체를 나타낸다. 나노입자의 농도가 낮으므로 시각적으로 뚜렷이 구별되지 않음을 알 수 있다.

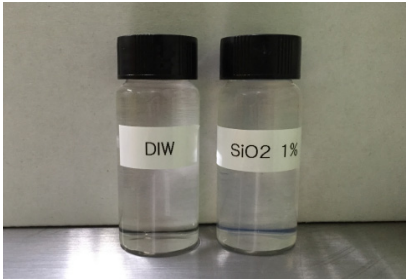


Fig. 1. DIW and SiO₂ nanofluids prepared by the ‘two-step method’

나노유체의 분산(Dispersion) 안정성을 판단하기 위해 DLS(Dynamic Light Scattering, Otsuka)를 이용하여 입자의 분산도를 측정된 결과 입자의 크기는 11.7 ~ 30.5 nm의 분포를 보였으며, 평균 입자의 크기는 27.8 nm이었다. 이는 제조사에서 제공한 SiO₂ 나노입자의 데이터(평균 24 nm)와 크게 다르지 않으므로 콜로이드 안정성(colloidal stability)이 높다고 볼 수 있다. 이를 근거로 실험을 위한 나노유체로 적합하다는 판단을 하였다. Fig. 2는 DLS 장비로 분산도를 측정했을 때의 입도분석 결과이며 비교적 평균 입자 크기 값과의 표준편차가 크지 않은 것으로 분석되었다.

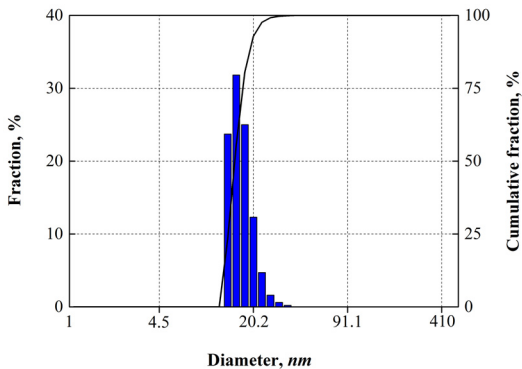


Fig. 2. DLS analysis results for 1 vol. % SiO₂ nanofluids

2.2 나노유체의 정적 열전도도 측정

정적 열전도도(Static thermal conductivity, k_s)는 비정상열선법(Transient hot wire(THW) method)을 기반으로 하는 상용 열전도도 측정 장비인 KD2-Pro (Decagon Devices, Inc.)를 이용하여 측정하였다. 본 장비는 열전도도 외에 비열(Specific heat), 열저항(Thermal resistivity) 및 확산도(Diffusivity)의 측정이 가능하다. 측정용 프로브(Probe)는 지름이 1.27 mm이고 길이가 6 cm인 유체용 탐침(KS-1)을 사용하였으며, THW 방법의 경우 프로브를 순간적으로 가열하면서 동시에 시간 변화에 따른 온도 변화를 측정하여 열전도도를 계산한다. 나노유체의 열전도도 측정 전 표준시료인 글리세린(Glycerin)을 이용해 측정 장치에 이상이 없음을 확인하였다.

정적 열전도도의 측정을 위해 합성된 SiO₂ 나노유체의 일부를 20 ml 바이알(Vial)에 추출한 후, 탐침이 바이알의 중간에 위치하여 유체와 충분히 접촉하도록 고정했다. 측정 중에는 장치 및 탐침의 이동 등으로 인해 진동이 발생하여 측정결과에 영향을 줄 수 있으므로 주의하였다. 또한, 상온과 다른 온도에서의 정적 열전도도 측정을 위해 Fig. 3과 같이 외부 온도 센서와 연동하여 동작하는 가열판(Hot plate, PC-420D-120D, Corning)을 이용해 물의 온도를 일정하게 유지하며 나노유체 샘플을 중탕하여 측정하였다. 물중탕 시 열대류로 인한 측정 데이터의 흔들림을 최소화하기 위하여 바이알의 높이까지 물을 충분히 채우고 온도 센서는 중간 높이에 위치시켜 온도를 제어하였다. 통계학적 데이터 분석을 위해 같은 온도에서 3번 이상 측정하였으며, 측정값 간 최대오차는 3.5 % 정도였다.

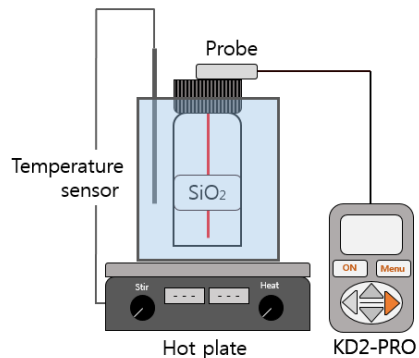


Fig. 3. Schematic of experimental setup for measurement of static thermal conductivity using hot plate and commercial thermometer (i.e., KD2 Pro)

2.3 나노유체의 동적 열전도도 측정

2.3.1 실험장치

나노유체의 동적열전도도(Dynamic thermal conductivity, k_d) 측정을 위한 시험 장치구성은 Fig. 4와 같다. 채널 내 시험 유체의 유량(Flow rate)을 조절하기 위해 0.25 % 이내의 정확도로 유량제어가 가능한 정밀 주사기 펌프(Syringe pump, PHD/ULTRA, Harvard Apparatus)가 사용되었다. 펌프에는 시험체로의 나노유체 주입을 위한 테플론(Teflon) 튜브(Tube)와 연결하기 위해 루어락(Luer-lock) 형태의 텃을 가진 주사기(140 ml, Covidien) 4개가 병렬로 연결되었다. 나노유체는 주사기 펌프로부터 압력을 받아 중간에 테프론 튜브를 거쳐서 실제 열전달 성능을 계측하기 위한 유동 채널로 흘러들어 간다.

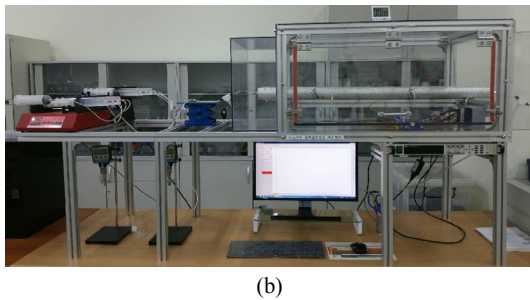
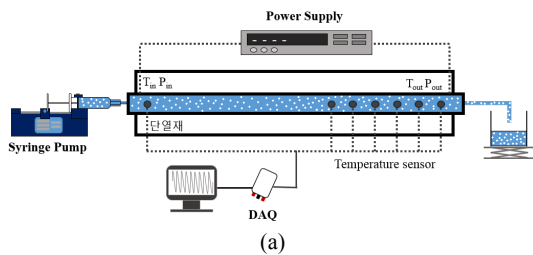


Fig. 4. Experimental apparatus for measurement of dynamic thermal conductivity
(a) Schematic setup (b) Real measurement system

유동 채널로는 길이가 1 m이고 내경이 1.75 mm인 스테인리스 스틸(Stainless steel) 소재의 원형 관을 사용하였으며, 채널 내 벽면의 균일한 열 유속(Heat flux) 조건으로의 가열을 위해 합금철(Cr: 20 %, Al: 3 %, Fe: Remainder) 열선을 관 외벽에 사선방향으로 일정 간격(즉, 5 mm)으로 부착하였다. 열선의 Joule 가열을 위한 전원공급(Power supply, IT6513, ITECH) 장치는 열선과 연결되어 유동 채널을 가열한다. 열선 외부에는 절연재(Ceramic fiber)와 단열재(Polyethylene resin)로 마감

하여 안전성과 외부단열성을 향상했다. 관 내부의 유체 온도변화를 측정하기는 어려우므로 관 외벽에 일정 간격(10 cm)으로 OMEGA 사의 T-type 온도 센서를 설치하였으며, 채널의 입·출구 쪽에도 T자 관을 사용하여 유체의 입·출구 온도를 측정하였다. 온도데이터 수집 및 분석을 위해 DAQ(Data acquisition, PXI-4220, National Instrument) 장치 및 LabVIEW v2014(National Instruments) 소프트웨어가 활용되었다.

2.3.2 실험절차

채널 내 유동에서의 열 성능(Thermal performance) 평가를 위해 열선을 통해 채널 벽면이 가열된 상태에서 나노유체를 일정한 유량으로 흘리며 온도를 측정하였다. 동적 열전도도의 측정을 위한 시험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental conditions for measurements of dynamic thermal conductivity

Fluids	Flow rate [ml/min]	Heat flux [kW/m ²]
DIW	30	9.4
SiO ₂ nanofluids (1 vol. %)	35	
	40	34.1

모든 시험 조건의 Re수는 428 ~ 678의 범위로 층류 유동의 범위에 놓여있다. 유동 채널의 벽면으로부터 균일한 열 유속 조건에 대해 열평형 상태(Thermal equilibrium state)에서의 평가를 위해 시간의 흐름에 따른 온도변화가 거의 없을 때의 온도측정 데이터를 활용하였으며, 동적 열전도도는 아래 Eq. (1)을 활용하여 계산하였다[11].

$$k_d = \frac{11}{48} \frac{\rho c_p V}{L\pi} \frac{(T_{out} - T_{in})}{(T_w - T_m)} \quad (1)$$

여기서, k_d 는 유체의 동적열전도도[W/m-K], ρ 는 유체의 밀도[kg/m³], c 는 비열[J/kg-K], V 는 유속[m³/s], L 은 채널의 길이[m], T_m 은 유체의 평균 온도[°C], T_w 는 벽면 온도[°C], T_{out} 은 유체의 출구 온도[°C], T_{in} 은 유체의 입구 온도[°C]를 각각 나타낸다.

Fig. 5에 보이는 바와 같이 동적열전도도의 변화는 시간이 흐름에 따라 열평형 상태가 되기 때문에 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 이를 통해 열평형상태를 만들기 위한 충분한 양의 유체가 주입되었는지를 확인할 수

있었다. 또한, 나노유체의 열전달 성능 평가를 위해 기본 유체(즉, 초순수)를 활용한 실험(Baseline)을 먼저 수행하여 시험 장치의 정확도(Accuracy)를 확인하였다. 이는 단상(Single phase) 유체에서의 동적열전도율은 입자의 거동에 의한 영향이 없기 때문에 정적열전도율과 동일해야 하기 때문이다. 이후 같은 시험조건에서 나노유체에 대해 측정 시험을 연속적으로 수행하였고, 모든 유량 및 온도조건에 대하여 3번의 시험을 반복하여 정밀도(Precision)을 평가하였다. 이와 더불어 입자와 벽면 간의 상호 작용 평가를 위해 나노유체의 유동 이후 다시 DIW 유동에서의 열전도도 값을 측정하여 최초에 측정 한 값과 비교하였다. 모든 조건에서 시험환경(예: 벽면 가열 조건 및 센서의 측정 오차 등)을 유사한 조건으로 유지하기 위하여 모든 실험은 동일한 시험체에서 수행되었다.

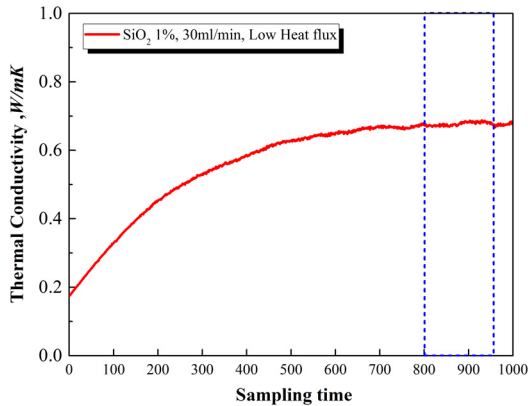


Fig. 5. Measured dynamic thermal conductivity values of 1 vol. % SiO₂ nanofluids over time

2.3.3 측정 불확도(Measurement uncertainty)

실질적으로 대류열전달 특성은 유체의 종류 및 열 물성, 유동 채널의 기하학적 조건, 시험변수(유속 및 벽면 온도 조건) 등 다양한 요인의 영향을 받아서 결정된다. 하지만, 온도 측정 외의 대부분의 요인은 실험을 수행하면서 통제할 수 있다. 이에 벽면 온도와 유체의 온도 계측을 통한 동적열전도도 예측에서의 불확도를 Kline and McClintock 방식[12]에 따라 Eq. (2)와 같이 계산하였다. 최종적으로 본 실험의 측정 불확도(ω)는 $\pm 5\%$ 로 분석되었다[11].

$$w_k = \left[\left(\frac{\partial k}{\partial (T_{out} - T_{in})} w(T_{out} - T_{in}) \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial (T_w - T_m)} w(T_w - T_m) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

3. 수치해석

3.1 수치해석 모델

일반적으로 나노유체는 나노입자의 안정된 분산특성 때문에 단상 유체로 간주한다. 이에 따라 나노유체의 열-물성값은 입자 체적 분수(Particle volume fraction)의 함수로서 정의된다. 특히, 밀도(Density, ρ_{nf})와 비열(Specific heat, $c_{p,nf}$)은 아래와 같이 혼합물 규칙(Mixture rule)에 의해 간단히 계산된다.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (3)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_s \quad (4)$$

여기서, ϕ 은 나노유체의 부피농도[%], 아래첨자 nf 는 나노유체, f 는 기본유체, s 는 나노입자를 각각 나타낸다.

또한, 나노유체의 유효 점성(Viscosity, μ_{nf})과 열전도도(Thermal conductivity, k_{nf})는 각각 Nielsen에 의해 제안된 Einstein 방정식의 변형모델[9]과 Feng-Kleinstreuer(F-K) 모델[14]을 활용하여 계산되었다. F-K 모델에서 열전도도는 Eq. (6)과 같이 혼합 규칙(Mixture rule)에 의한 나노입자-기본유체 간 혼합물질의 열전도도(k_{static})를 바탕으로 분산된 나노입자의 브라운 운동에 의한 마이크로 혼합(Micromixing) 효과($k_{Brownian}$)를 추가로 고려함에 의해 계산된다. 일반적으로, 350 K 이하의 온도에서 직경이 20 ~ 50 nm의 범위에 있는 금속산화물 나노입자의 5 vol. % 이하의 매우 낮은 체적 농도를 가진 나노유체의 열전도도 예측에 정확성이 높은 것으로 알려져 있다[14].

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 1.5\phi_p)e^{\phi_p(1 - \phi_m)} \quad (5)$$

$$k_{nf} = k_{static} + k_{Brownian} \quad (6)$$

여기서,

$$k_{static} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_f)\phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_f)\phi} k_f$$

$$k_{Brownian} = 49500 \frac{k_B}{6\pi\mu_f d_p} (\rho c_p)_{nf} \phi^2 (\overline{T} \ln \overline{T} - \overline{T})$$

여기서, d_p 는 나노입자의 직경[m], \overline{T} 는 시간평균 온도 [°C]를 각각 나타낸다.

해석을 위해 사용된 유동 채널의 수치해석 모델은 실험에 사용된 크기와 동일하게 구성되었으며, 채널의 벽면은 균일한 열 유속(Constant heat flux) 조건이 적용되었고 입-출구 경계조건은 시험조건과 동일한 질량유속입구(Mass flow inlet) 및 대기압출구(Pressure outlet) 조건이 적용되었다.

3.2 수치해석 방법

수치해석을 위해 상용 유체역학 해석 소프트웨어인 Fluent™ v16.0이 사용되었고, 지배방정식(Governing equations)은 비압축(Incompressible), 층류 조건을 기반으로 한 정상상태 열전달 해석을 위해 아래의 Eq. (7)와 Eq. (8)과 같이 정의되었다.

$$(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} \quad (7)$$

$$(\vec{v} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T \quad (8)$$

여기서, \vec{v} 는 유속[m/s], p 는 압력[Pa]을 각각 나타낸다.

수치해석의 정확성을 높이기 위해 열선에 의한 전기적 가열 및 유동채널의 소재인 스테인리스 스틸을 통한 전도 열전달(Conductive heat transfer)은 수치해석에 직접 고려하지 않았고, 내벽과 유체 간 대류 열전달(Convective heat transfer)만 고려하였다. 하지만, 수치해석 결과는 관 내부의 온도(T_i)이기 때문에 시험측정 결과와의 직접적인 비교가 불가능하다. 따라서 수치해석 결과를 바탕으로 Fig. 6에 보이는 바와 같이 1D 열저항 분석법(Thermal-electrical analogy)을 통해 최종 관 외부 온도(T_w)를 Eq. (9)과 같이 예측하였다.

$$q_k'' = q_t'' - q_h'' = \frac{T_w - T_i}{\frac{\delta_s}{k_s}} \quad (9)$$

여기서, q'' 는 열유속(Heat flux, [W/m²]), δ_s 는 채널의 두께[m]를 각각 나타낸다.

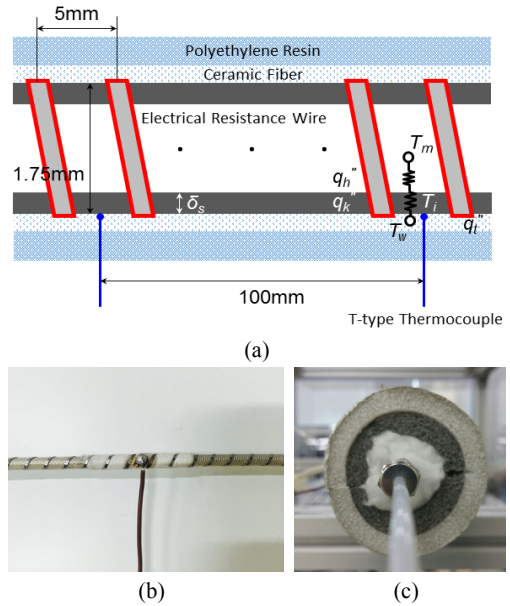


Fig. 6. Detailed experimental apparatus:
 (a) Schematic of electrical analogy for calculation of one-dimensional heat transfer
 (b) T-type thermocouple soldered on a tube that has been uniformly coiled by electric resistance wire
 (c) Test section surrounded by thermal insulator (i.e., polyethylene resin and spun ceramic fiber)

4. 수치해석/시험 결과 및 분석

4.1 정적 열전도도 측정 결과

Table 1에 정리된 내용과 같이 동적 열전도도 측정 시험은 두 가지(즉, 9.4 및 34.1 kW/m²) 벽면 열유속 조건에 대해서 수행하였다. 그 결과 벽면의 평균온도는 대략적으로 26 °C 및 41 °C로 확인되었다. 이에 Fig. 7과 같이 두 온도에서 KD2-Pro를 활용하여 SiO₂ 나노유체와 기본유체(DIW)의 정적 열전도도를 측정하였고, 이를 F-K모델[14]에 의한 계산값과 비교하였다. 비교적 측정 결과는 이론값과 유사했으며, 낮은 체적농도에도 불구하고 모든 조건에서 SiO₂ 나노유체의 열전도도는 기본유체에 비해 항상($k_{s,nf}/k_{s,bf} > 1$)되었음을 확인하였다. 다만, 낮은 온도(26 °C)에서 5.9 %로 편차가 큰 것으로 측정되었으나, KD2-Pro의 측정오차가 ±5 %임을 감안하면 큰 차이는 아닌 것으로 판단된다. 이와 더불어 고온에서의 측정의 경우 물중탕 시 가열에 의한 약한 대류현상이 측정결과에 영향을 미쳤을 경우도 배제할 수 없다.

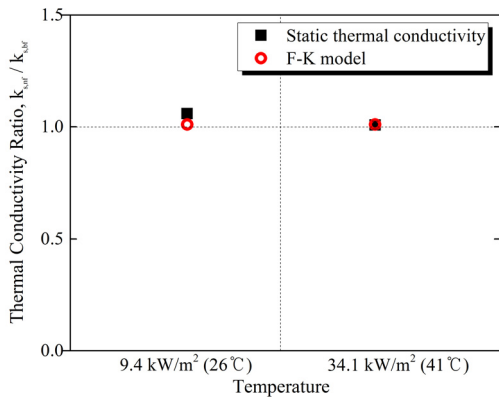


Fig. 7. Comparison of static thermal conductivity values at different temperatures (The subscripts nf and bf refer to the nanofluid and the basefluid, respectively.)

4.2 동적 열전도도 측정 결과

모든 시험 조건에 대해 시간의 흐름에 따른 동적 열전도도를 계산하였으며, 반복적인 실험을 통해 충분히 결과 값이 수렴한 것으로 판단되는 구간(즉, Fig. 5에서의 파란색 점선 구간)에서의 평균값을 동적 열전도도로 정의하였다. 즉, 정상 상태(Steady state)가 된 이후에 약 2 분간의 데이터를 추출(Sampling)하여 계산하였다. Fig. 8에 보이는 바와 같이 유체가 완전히 발달된 상태(Fully developed flow)를 나타내는 위치에서는 입-출구 간 유체의 평균온도(실선, T_m)와 열전대의 측정 데이터(네모 심볼, T_w) 간 온도차가 일정해지며 서로 평행을 이루게 된다. 이는 Fig. 8의 시험결과에도 잘 나타나 있다.

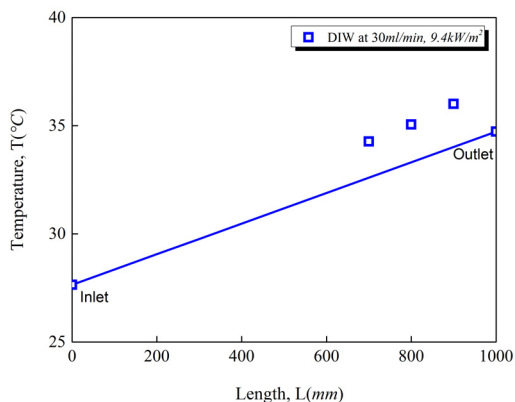


Fig. 8. Measured wall temperatures at 5 axial distances (700, 800, and 900 mm), and the mean fluid temperatures at inlet ($x = 0$ mm) and outlet ($x = 1,000$ mm) of tube for DIW

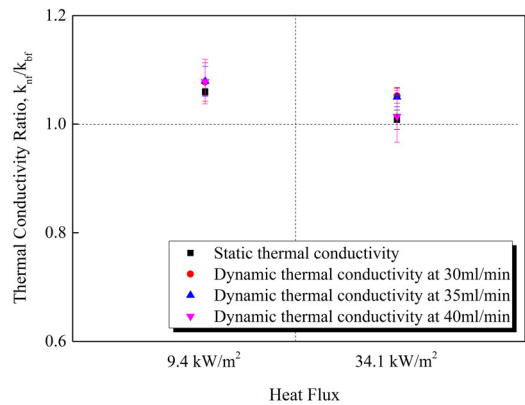


Fig. 9. Comparison of static and dynamic thermal conductivity ratio (k_{nf}/k_{bf}) between DIW and SiO₂ nanofluids at different heat fluxes

Fig. 9에 SiO₂ 나노유체의 정적 열전도도와 동적 열전도도 간 비교를 나타내었다. 모든 실험 조건에서 동적 열전도도 값이 정적열전도도보다 높게 측정되었다. 이는 나노유체 자체의 열전도도 항상 외에 유동속에서 입자의 움직임이나 채널 내 벽면과 입자 간 상호작용이 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면에, 높은 열 유속 조건(34.1 kW/m²)에서는 정적 열전도도 대비 동적 열전도도의 증가 비율은 감소하였다. 이는 높은 열 유속에 따른 벽면에서의 입자의 높은 열 영동 속도(thermophoretic velocity)에 따른 입자 분포의 불균형성 때문인 것으로 판단된다. McNab and Meisen[15]에 의하면 열 영동 속도(V_T)는 다음과 같이 정의된다.

$$V_T = -\beta \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\nabla T}{T} \quad (10)$$

여기서,

$$\beta = 0.26k_{bf}/2(k_{bf} + k_p)$$

$$\nabla T \approx (T_w - T_m)/(r_w - r_m)$$

높은 열 유속 조건(34.1 kW/m²)에서 채널의 벽면 온도와 채널의 중심에서의 유체의 온도차(즉, $T_w - T_m$)은 대략 6 °C로 낮은 열 유속에서의 값(즉, 2 °C)에 비해 높은 것으로 측정되었다. 온도에 따른 열-물리 값의 변화는 크지 않기 때문에 열 영동 속도는 단면에서의 온도 변화(Temperature gradient)에 크게 의존한다. 즉, 높은 열 유속 조건에서 벽면 주변에서의 입자의 운동이 더욱 활발한 것으로 판단할 수 있다. 이에 따라 입자의 분포가 채

널 내 중심에 집중되기 때문에 상대적으로 벽면에서의 입자 농도가 낮아져 열 성능이 저하된 것으로 분석되며, 이 결과는 Al_2O_3 를 사용한 다른 연구팀의 선행 연구에서도 관측되었다[11].

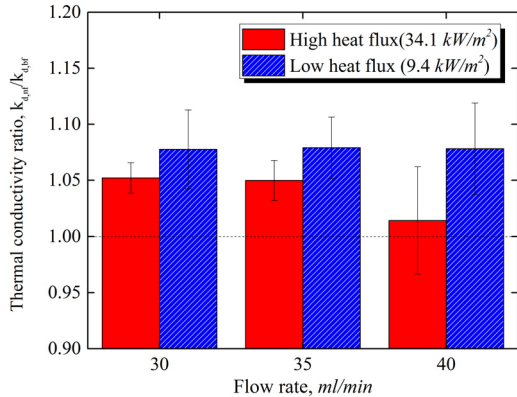
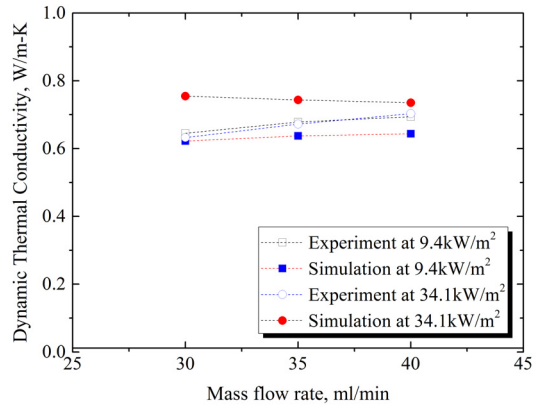


Fig. 10. Dynamic thermal conductivity ratio ($k_{d,m}/k_{d,bf}$) between DIW and SiO_2 nanofluids at different heat fluxes

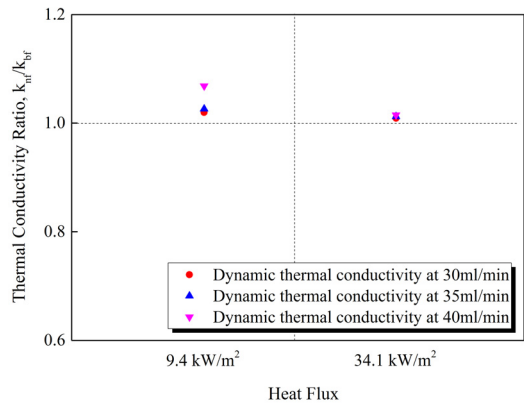
Fig. 10은 모든 시험조건에서의 나노유체와 DIW 간 열전도도 값의 비교를 나타낸다. 기본 유체(DIW) 대비 최고 7.9%까지의 열전도도 향상을 보였으나, 가장 높은 열 유속(34.1 kW/m^2) 및 유량(40 ml/min) 조건에서는 기본 유체에 비해 열전도도의 상승률이 감소하였다. 이 조건이 열 영동 속도가 가장 큰 경우로 입자 분포의 불균형뿐만 아니라 입자의 활발한 운동에 따른 측정 정밀도의 저하(즉, 큰 표준편차)도 한 가지 원인으로 판단된다.

4.3 동적 열전도도의 수치해석 결과

우선, 나노유체의 열전달 효과를 확인하기 전에 수치해석 모델의 정확성을 확인하기 위하여 기본유체인 초순수에 대해 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. Fig. 11(a)의 결과는 Fig. 6(a)에 나타난 ID 열저항 분석법에 의한 계산된 초순수의 동적 열전도도 값으로, 실험과 수치해석 간 평균오차는 8.6%였다. 고열 유속 조건에서의 오차가 비교적 크게 나타났는데, 이는 수치해석 시 온도에 따른 열선의 비저항(Resistivity) 변화를 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 11. Numerical predictions of dynamic thermal conductivity values for DIW and SiO_2 nanofluids

(a) Comparison of dynamic thermal conductivity values between experiments and simulations for DIW

(b) Dynamic thermal conductivity enhancement

또한, 수치해석을 통해서 SiO_2 나노유체의 동적열전도도를 계산하여 Fig. 11(b)과 같은 결과를 얻었다. 이때, 나노유체의 열-물성값은 Eq. (3) - (6)의 식을 이용해서 계산되었으며, 계산결과 최대 2% 정도의 열전도도 개선이 확인되었다. 이는 실험결과인 최대 7.9%에 비해서는 작은 수치로, 본 수치해석은 연속체 역학 기반으로 수행됨에 따라 입자의 미시적인 운동을 별도로 고려하지 못했기 때문으로 판단된다. 즉, 이는 낮은 입자 농도의 나노유체의 열전도도 개선은 나노유체 자체의 정적 열전도도 향상에 의해서만 설명되기는 어려우며, 유동 내에서 입자의 미시적인 운동이나 채널 내부 벽면과의 상호작용을 고려해야 함을 의미한다.

4.4 나노입자-벽면 간 상호작용 분석

실제 유동 내에서 나노입자의 거동에 의한 열전달 개선을 정량적으로 측정하기란 어렵다. 다만, 유동 채널의 벽면에서 나노입자 거동 특성은 실험을 종료한 후 벽면의 광학적 관찰을 통해 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서는 SiO₂ 나노유체의 열 성능 측정 이후 DIW를 다시 흘렸을 때 열전도도를 Fig. 12와 같이 측정해 보았다. 최초로 깨끗한 튜브에서 DIW의 열전도도를 측정했을 때 보다 측정값이 높게(최대 43.6 %의 향상) 나왔다. 이는 나노유체의 흐름에 의해 채널 벽면에서의 경계 조건의 변화가 생긴 것으로 판단된다.

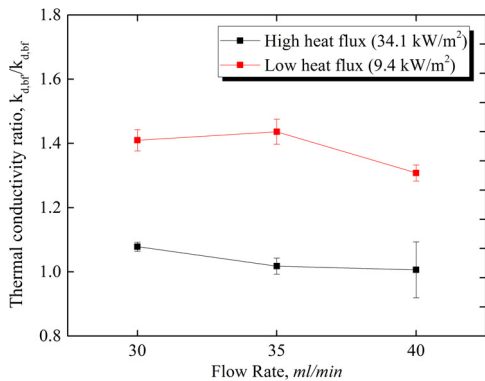


Fig. 12. Enhanced thermal performance in flow of DIW (after experiments using nanofluids) at different heat fluxes

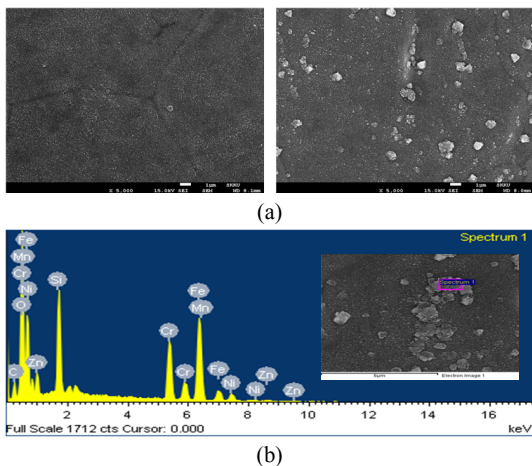


Fig. 13. Surface analysis results after nanofluids experiments (a) SEM images showing precipitation of SiO₂ nanoparticles on the heat exchanging surface (b) EDS analysis results for the precipitated nanoparticles

Fig. 13(a)는 나노유체 실험 전과 실험 후의 채널 안쪽의 벽면의 주사광학현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM) 분석결과이다. 분석은 5000배의 배율로 진행되었으며, 나노유체를 흘려주기 전의 채널에서 볼 수 없는 입자가 시험 후의 채널에서는 발견되었다. 입자의 성분을 알아보기 위해 EDS(Energy dispersive x-ray spectroscopy) 분석한 결과는 Fig. 13(b)과 같다. 채널의 성분에 포함되지 않은 상당량의 Si가 검출되었으며, 이는 나노유체에 포함되어있는 입자와 벽면간의 상호작용으로 인해 벽면에 흡착된 것으로 분석된다. 결국 이와 같은 입자의 고립된 침전(Isolated precipitation)은 표면특성 변화(즉, 유효 열전달 면적의 증가)를 야기했을 것으로 분석된다. 비록 나노유체의 농도증가 및 반복된 실험으로 인한 요인을 고려하더라도, 나노입자의 벽면 흡착에 의한 나노핀(Nanofin) 형성은 정적열전도도 측정값(약 3.4 %)이나 이론에 의한 예측(약 1 %) 및 수치해석에 의한 열전달 해석결과(약 2 %) 대비 높은 열성능 개선의 주요 요인으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 SiO₂ 나노유체의 채널 내 유동에서의 동적열전도도 측정을 통해 벽면에서의 나노입자 거동이 열전도도에 미치는 영향을 실험적·이론적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (i) 많은 연구에서 발견된 내용과 동일하게 SiO₂ 나노유체는 기본 유체(DIW)보다 실험과 수치해석 결과 모두 높은 열전도도를 나타내었다.
- (ii) 특히, 입자의 운동 에너지가 비교적 적은 충류유동(낮은 열 유속 및 유량) 조건에서 입자-유동벽면 간 상호작용에 의한 경계조건 변화(즉, 유효 열전달 면적 증가)에 의한 열 성능 개선이 추가로 관측되었다.
- (iii) 하지만, 벽면 열 유속 및 유량의 증가(즉, 입자의 운동에너지 증가)에 따른 열 영동 속도의 증가는 유동 채널의 중심부보다 벽면(온도 측정 지점)에서 상대적으로 낮은 입자분포를 초래하였고, 이에 따라 열전도도의 상승률이 저하되었다.

상기 기술된 결론은 나노유체를 활용한 열전달 연구에서 나노유체 자체의 열-물성 변화뿐만 아니라 유동 내에서 발생할 수 있는 입자의 미시적인 거동해석이 매우 중요함을 의미한다. 향후 다양한 물질 및 경계조건(온도, 유량 등)에서의 냉각 성능 향상을 위하여 벽면에서의 입자 거동에 대한 이론적 연구 및 실험적 연구를 계속 수행할 예정이다.

References

- [1] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (Dispersion of γ - Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles)", *Netsu Bussei*, vol. 7, pp. 227-233, 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2963/jjtp.7.227>
- [2] S. Özerinç, S. Kakaç, A.G. Yazicioğlu, "Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review", *Microfluid. Nanofluid.*, vol. 8, pp. 145-170, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10404-009-0524-4>
- [3] A. Vatani, P. L. Woodfield, D.V. Dao, "A Survey of practical equations for prediction of effective thermal conductivity of spherical-particle nanofluids", *J. Mol. Liq.*, vol. 211, pp. 712-733, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2015.07.043>
- [4] L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises, "Enhancement of heat transfer using nanofluids-An overview", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 14, pp. 629-641, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.004>
- [5] J. T. Kwon, T. H. Nahm, T. W. Kim, Y.C. Kwon, "An Experimental Study on Pressure Drop and Heat Transfer Coefficient of Laminar Ag Nanofluid flow in Mini Tubes", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 10, pp. 3525-3532, 2009.
- [6] Y. G. Kim, S. H. Jo, Y. J. Seong, H. S. Chung, H.M. Jeong, "Experimental investigation of heat transfer characteristics of alumina nanofluid", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, pp. 16-21, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.1.16>
- [7] L. Yu-Hua, Q. Wei, F. Jian-Chao, F., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity of Nanofluids", *Chinese. Phys. Lett.*, vol. 25, pp. 3319-3322, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0256-307X/25/9/060>
- [8] C.H. Li, G.P. Peterson, "Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids)", *J. Appl. Phys.*, vol. 99, pp. 084314, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2191571>
- [9] M. Chopkar, S. Sudarshan, P.K. Das, I. Manna, "Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid", *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 39, pp.1535-1542, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-007-9444-7>
- [10] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, "Thermal Conductivity of Suspensions Containing Nanosized SiC Particles," *Int. J. Thermophys.*, vol. 23, pp.571-580, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1015121805842>
- [11] Y.S. Na, K.D. Kihm, J.S. Lee, "ReD-dependence of Dynamic Thermal Conductivities of Nanofluids," *Int. J. Heat Mass Tran.*, vol. 55, pp. 7933-7940, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.026>
- [12] S.J. Kline, F.A. McClintock, "Describing uncertainties in single sample experiments", *Mechanical Engineering*, vol. 75, pp. 3-8, 1953.
- [13] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, "Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids", *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, pp. 560-568, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2007.05.004>
- [14] C. Kleinstreuer, Y. Feng, "Thermal nanofluid property model with application to nanofluid flow in a parallel-disk system-Part I: A new thermal conductivity model for nanofluid flow", *J. Heat Transf.*, vol. 134, pp. 051002, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4005632>
- [15] G.S. McNab, A. Meisen, "Thermophoresis in Liquids" *J. Colloid Interf. Sci.*, vol. 44, pp. 339-346, 1973.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9797\(73\)90225-7](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9797(73)90225-7)

박 현 아(Hyun-Ah Park)

[준회원]



- 2015년 2월 : 명지대학교 화학공학과 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 에너지환경융합공학과 (석사과정)

<관심분야>

나노유체, 열전달, 에너지

박 지 현(Ji-Hyun Park)

[준회원]



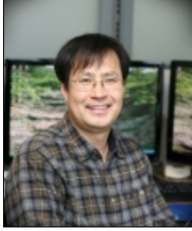
- 2014년 8월 : 명지대학교 화학공학과 (공학사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 성균관대학교 화학공학과 (석사과정)

<관심분야>

에너지저장매체(슈퍼커패시터, 배터리)

정 락 교(Rag-Gyo Jeong)

[정회원]



- 1999년 8월 : 인하대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 인하대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1990년 12월 ~ 1994년 12월 : 한진중공업 사원
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

전기전자, 열차제어, 시스템엔지니어링

강 석 원(Seok-Won Kang)

[정회원]



- 2007년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 기계항공시스템학부 (공학석사)
- 2012년 5월 : 미국 Texas A&M University, College Station 기계공학과 (공학박사)
- 2012년 5월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교(UST) 에너지환경융합공학과 (부교수)

<관심분야>

N/MEMS, 마이크로 열전달, 에너지저장매체, 다중물리해석