

비정상열선법을 이용한 나노유체 열전도도 측정 시 자연대류 개시점에 대한 연구

이승현* · 김현진* · 장석필*†

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Onset of Natural Convection in Transient Hot Wire Device for Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids

Seung-Hyun Lee*, Hyun Jin Kim* and Seok Pil Jang*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received September 29, 2010 ; Revised December 6, 2010 ; Accepted December 7, 2010)

Key Words : Onset Time of Natural Convection (자연대류 개시점), Transient Hot Wire Method(비정상 열선법), Nanofluids(나노유체), Thermal conductivity(열전도도), Al₂O₃ Nanoparticles(산화알루미늄 나노입자)

초록: 본 논문에서는 비정상열선법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정시, 자연대류 개시점을 수치적 방법을 통하여 파악해 보았다. 측정 유체는 부피비 1, 4, 10% 를 갖는 물-기반 알루미나 나노유체이고, 이에 대한 물성치는 기존 이론모델 및 실험적 상관관계식을 이용하여 계산하였다. 비정상열선법 장치는 FDM 방식으로 모델링 되었으며, 자연대류의 개시점은 중력장하의 열선의 온도변화를 관찰함으로써 파악하였다. 자연대류의 개시점은 물의 경우 11.5 초이고, 10% 부피비에서 Maxwell 모델로 열전도도를 예측한 알루미나 나노유체인 경우 41.6 초로 계산되었다. 특히 부피비가 증가할수록 자연대류가 늦게 발생함을 확인하였으며, 계산된 결과를 이용하여 비정상열선법의 실린더 내부에서 나노유체의 자연대류 개시점을 예측할 수 있는 관계식을 제시하였다. 또한 비정상열선법으로 열전도도를 측정할 때, 기본유체의 자연대류 발생시점 이전에 측정이 이루어진다면 나노유체의 열전도도 측정시 자연대류에 의한 측정오차는 무시할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: We perform a numerical study to determine the time of onset of natural convection in a transient hot wire (THW) device for measuring the thermal conductivity of nanofluids. The samples used in this simulation are water-based Al₂O₃ nanofluids with volume fractions of 1%, 4%, and 10%, and the properties are calculated by theoretical models and experimental correlations. The THW apparatus using coated wire is modeled by the control-volume-based finite difference method, and the start of natural convection is determined by observing the temperature rise of the wire under a gravity field. The onset time is 11.5 s for water and 41.6 s for water-based Al₂O₃ nanofluids predicted by Maxwell thermal conductivity model with a 10% volume fraction. We confirm that the onset time of natural convection of nanofluids in the cylinder increases with the nanoparticle volume fraction. We suggest a correlation for predicting the onset time on the basis of the numerical results. Finally, it is shown that the measurement error due to natural convection is negligible if the measurement using the transient hot wire method is completed before the onset of natural convection in the base fluid.

- 기호설명 -

- | | | | |
|-------|-------------------------------|--------|--------------------------|
| a | : 열선의 반경 [m] | d | : 나노입자 직경 [m] |
| b | : 실린더의 반경 [m] | g | : 중력가속도 [m/s^2] |
| c | : 절연된 열선의 반경 [m] | k | : 열전도도 [$W/m\cdot K$] |
| C_p | : 비열 [$J/kg\cdot K$] | K | : Kapiza 접촉열저항 상수 |
| C_l | : 비레상수(물: 7.2×10^7) | Pr | : 유체의 Prandtl 수 |
| | | p | : 압력벡터 [N/m^2] |
| | | q | : 단위 길이당 열 확산량 [W/m] |
| | | r | : 반경방향 좌표 |
| | | Re_p | : 나노입자의 Reynolds 수 |

† Corresponding Author, spjang@kau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

- T : 온도 [K]
- t : 시간 [sec]
- u : 속도벡터 [m/s]
- Ra : 측정유체의 Rayleigh 수

그리스문자

- α : 열확산계수 [m^2/s]
- β : 열팽창계수 [$1/K$]
- γ : Euler 상수 = 0.5772157
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- τ : 응력 텐서 [N/m^2]
- ϕ : 부피비
- μ : 점도 [$N \cdot s / m^2$]

하첨자

- eff : 나노유체
- w : 열선
- f : 유체
- c : 절연코팅
- ch : 특성길이
- p : 나노입자 (Bulk 크기)
- $nano,p$: 나노입자 (미소 크기)

1. 서론

나노유체란 소량의 나노입자를 물이나 Ethylene Glycol 과 같은 기존 열교환 작동유체에 분산, 부유시킨 공업용 유체로서 Stephen U. S. Choi 에 의해 뛰어난 열적 성능이 보고된 이후, 나노유체 열적 특성에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다.⁽¹⁾ 특히 나노유체의 열전도도는 기존 이론으로 예측할 수 없는 뛰어난 향상 폭이 보고됨에 따라 나노유체 분야에서도 가장 활발하게 연구되고 있는 분야이다.⁽¹⁾ 나노유체의 열전도도 측정 결과는 1999 년 미국 Argonne National Laboratory 의 Lee 등⁽²⁾이 비정상열선법을 이용하여 처음으로 보고 하였으며, 그 후 많은 연구자들이 비정상 열선법을 이용하여 나노유체의 열전도도를 측정하고 있다. 물-기반 알루미늄 나노유체의 열전도도는 이러한 비정상 열선법을 이용하여 초기 연구자들부터 많은 연구가 진행되어 왔지만,⁽²⁻⁷⁾ Fig. 1 에서 보듯이 동일한 부피비에서 단일화된 결과들이 보고 되지 못하고 있다. 이는 나노유체의 열전도도가 제조방법, 나노 입자의 크기, pH, 첨가제 등에 따라 달라지기 때문이기도 하지만,⁽⁸⁾ International Nanofluid Properties Benchmark Exercise (INPBE)⁽⁹⁾의 결과를 보면 동일한 나노유체임에도 불구하고 각 연구 그룹마다 상이한 결과들이 보고되고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한

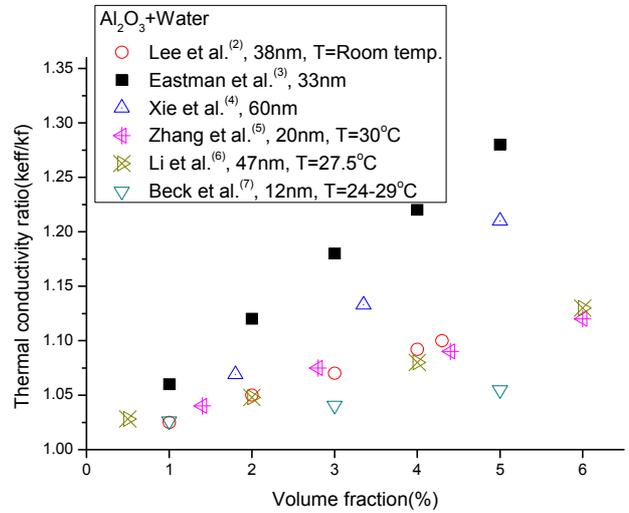


Fig. 1 Previous thermal conductivities of water based-Al₂O₃ nanofluids using transient hot wire method

차이는 측정장비의 신뢰성, 즉 나노유체 열전도도 측정에 널리 사용되는 비정상 열선법의 측정 오차에 기인함을 분명히 알 수 있다. 따라서 나노유체의 열전도도를 정확히 측정하기 위해서는 필수적으로 비정상 열선법의 신뢰성에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 연구가 필요하다.

비정상 열선법은 1931 년 Stalhane 과 Pyk⁽¹⁰⁾에 의해 분말의 열전도도를 처음으로 측정한 이후 실험적,⁽¹¹⁾ 해석적,^(11,12) 수치적⁽¹³⁾으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 자연대류는 비정상 열선법 장치의 신뢰성에 미치는 가장 중요한 인자 중 하나로써 이러한 영향을 줄이기 위해서는 자연대류가 발생하기 전에 측정이 이루어져야만 한다. 하지만 자연대류의 개시점은 이론적인 해석해만으로는 구하는 것이 쉽지 않다. 따라서 기존의 연구들을 살펴보면 다음과 같이 수치적인 방법을 이용한 것을 알 수 있다. Mohammadi 등⁽¹⁴⁾은 절연되지 않은 열선을 사용하였을 때 자연대류가 발생하는 시점을 1 차원 해와 2 차원 해의 온도증가값(ΔT)의 차이가 0.1% 이상 발생하는 순간으로 정의하였고, Rusconi 등⁽¹⁵⁾은 절연된 짧은 열선을 사용할 경우 자연대류가 발생하는 시점을 중력장의 유무에 따른 온도증가(ΔT)값의 차이가 1% 이상 발생하는 순간으로 정의하였다. 그러나 이들은 나노유체에 대한 체계적인 연구는 진행하지 않았다.

따라서 본 논문에서는 나노유체의 부피비에 따른 자연대류의 개시점을 파악하기 위하여 1, 4, 10% 부피비를 갖는 물-기반 알루미늄 나노유체를 측정유체로 상정하여 기존 이론식 및 상관관계식

들을 이용하여 물성치를 계산하였다. 또한 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 절연된 열선을 사용한 비정상 열선법 장치를 모델링하였고, 이를 이용하여 각 유체에 대하여 중력장의 유무에 따른 온도증가값(ΔT)을 관찰함으로써 자연대류의 시작점을 파악해 보았다. 마지막으로 수치적인 결과를 바탕으로 자연대류 개시점을 Rayleigh 수로 표현한 관계식을 제시하였다.

2. 해석적 및 수치적 해

비정상 열선법의 이론적 해석해는 무한한 반경에 대하여 일차원 열전달만을 고려하였기 때문에 온도증가값(ΔT)이 시간에 따라 무한히 증가하게 된다. 하지만 실제장치는 중력에 의한 2 차원 열전달로 인하여 자연대류가 발생하게 되고 열선의 온도증가값(ΔT)은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴하게 된다. 즉 이론적 해석해 만으로는 자연대류의 개시점을 파악하는 것은 불가능하므로, 자연대류의 개시점을 파악하기 위하여 중력장이 고려된 2 차원 열전달(중력장)에 대한 수치적인 연구를 수행해야만 한다.

2.1 이론적 해석해

비정상 열선법의 기본방정식은 열확산 방정식(Heat diffusion equation)으로부터 원통좌표계에 대해 다음과 같은 열선의 온도증가값(ΔT)에 관한 해로 주어진다.⁽¹⁶⁾

$$\Delta T_w = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \frac{4\alpha t}{r^2 \cdot e^{\gamma}} + \frac{r^2}{4\alpha t} + \dots \right] \quad (1)$$

열전도도 k 는 이 식에서 두 번째 이후 항을 무시한 후 시간에 따른 온도증가값(ΔT)을 측정함으로써 계산할 수 있다. 식 (1)은 열이 실린더 중앙에서 반경방향으로 무한히 ($r=\infty$) 퍼져나가고, 열선의 물성치 및 부피, 크기 등이 전혀 고려되지 않은 이상적인 경우를 가정한 것이다. 절연된 열선을 사용할 경우, 열선의 유한한 크기와 물성치를 고려한 해석적 해는 Nagasaka 와 Nagashima⁽¹⁷⁾에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta T_w = \frac{q}{4\pi k_f} \left[\ln \frac{4\alpha_f t}{c^2 e^{\gamma}} + A + \frac{1}{t} (B \cdot \ln t + C) \right] \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \frac{2k_f}{k_c} \ln \frac{c}{a} + \frac{k_f}{2k_w} \\ B &= \frac{1}{2k_f} \left[a^2 \left(\frac{k_c}{\alpha_c} - \frac{k_w}{\alpha_w} \right) + c^2 \left(\frac{k_f}{\alpha_f} - \frac{k_c}{\alpha_c} \right) \right] \\ C &= \frac{a^2}{8} \left[\left(\frac{k_f - k_c}{k_w} \right) \left(\frac{1}{\alpha_w} - \frac{1}{\alpha_c} \right) + \frac{4}{\alpha_c} - \frac{2}{\alpha_w} \right] \\ &\quad + \frac{c^2}{2} \left(\frac{1}{\alpha_f} - \frac{1}{\alpha_c} \right) + \frac{a^2}{k_c} \left(\frac{k_c}{\alpha_c} - \frac{k_w}{\alpha_w} \right) \ln \frac{c}{a} \\ &\quad + \frac{1}{2k_f} \left[a^2 \left(\frac{k_c}{\alpha_c} - \frac{k_w}{\alpha_w} \right) + c^2 \left(\frac{k_f}{\alpha_f} - \frac{k_c}{\alpha_c} \right) \right] \ln \frac{4\alpha_f}{c^2 e^{\gamma}} \end{aligned}$$

이렇게 주어진 식 (2)는 절연층의 반경($r=c$) 및 열선의 반경($r=a$)의 복합적 형상에 대한 경계조건들까지 고려하였지만, 여전히 일차원 열전달만이 고려되어있기 때문에 자연대류의 개시점을 파악하기는 불가능하다.

2.2 수치해석 모델

본 연구에서는 중력장이 포함된 2 차원 열전달 모델을 고려하였다. 수치해석에 사용된 해석모델은 Fig. 2 와 같이 주어지며 실린더내부 전체를 해석공간으로 하여 비정상모드(Transient mode)로 해석을 수행하였다. Grid 의 Point 는 1632 개, Element 는 1280 개 이고, Time Step 은 0-10 초까지 0.01sec 이며 10-100 초까지는 0.2sec 로 계산하였다. 한 Time Step 당 반복한 계산 수는 1000 번이었고 계산방법은 FDM (Control-Volume-based Finite Difference Method)을 기반으로 한 상용 소프트웨어를 이용하였다. 해석모델 형상의 수치는 Table 1 에 주어져 있고 열선 및 절연층의 물성치는 Table 2 와 같다. 원통 좌표계에서 비정상, 비압축성유체에 대하여 유동 및 온도 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\text{r-momentum} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + u \cdot \nabla v_r - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left[\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right]$$

$$\theta\text{-momentum} \quad (5)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + u \cdot \nabla v_\theta + \frac{v_r v_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\mu}{\rho} \left[\nabla^2 v_\theta - \frac{v_\theta}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right]$$

$$\text{y-momentum} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + u \cdot \nabla v_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - g\beta\Delta T + \frac{\mu}{\rho} [\nabla^2 v_r]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T \quad (7)$$

식 (6)의 수직방향(y-direction) 운동방정식에서 자연대류 문제를 풀기 위한 Boussineq 근사를 적용하였으며, 식 (7)의 에너지 방정식에서 점성 소산은 무시하였다. 경계조건과 초기조건은 다음과 같다.

$$v_r = v_\theta = v_y = 0, T = ambient \text{ at } y=0, t=0 \quad (8)$$

또한 유체의 표면(r=b)에서 주변온도(295.2K)와 같은 일정 온도 조건(constant temperature condition)을 사용하였고, 압력은 대기압이며 중력의 방향은 수직방향으로 $g=-9.81\text{m/s}^2$ 을 적용하였다. 수렴조건은 모든 Grid Point 에서 이전 계산결과값과 현재 계산값의 차이의 합이 유동 1×10^{-7} , 에너지 1×10^{-8} 일 때로 하였다.

2.3 나노유체의 물성치

수치해석적인 해를 구하기 위해서는 우선 물-기반 알루미늄 나노유체의 물성치를 알아야 한다. 따라서 본 연구에서는 순수물(DI-water)에 45nm 크기의 알루미늄 나노입자를 포함한 경우를 가정하여 기존에 잘 알려진 이론적인 모델 및 실험적인 상관관계식을 이용하여 물성치를 예측해 보았다. 그러나 열전도도의 경우 서론부분에서 언급하였듯이 동일 부피비에서 다양한 실험데이터가 보고 되고 있기 때문에 두 가지 모델을 사용하여 물성치를 예측해 보았다. 첫 번째는 혼합물의 열전도도를 예측하기 위해 널리 사용되는 Maxwell 열전도도 모델이고 두 번째는 나노유체의 열전도도 향상 메커니즘인 나노입자의 Brownian motion 을 고려한 Jang&Choi 열전도도 모델이다.

1) 비열(열평형모델⁽¹⁸⁾)

$$Cp_{eff} = \frac{(\rho Cp)_f(1-\phi) + (\rho Cp)_p\phi}{\rho_f(1-\phi) + \rho_p\phi} \quad (9)$$

2) 밀도(혼합법칙)

$$\rho_{eff} = \rho_f(1-\phi) + \rho_p\phi \quad (10)$$

Table 1 Conditions of numerical simulation

Input power	5.238 W/m
Bare platinum wire radius	a=25μm
Total coated wire radius	c=50μm
Cylinder radius and length	b=10mm, L=193mm

Table 2 Properties of hot wire

	k [W/mK]	α [10 ⁷ m ² /s]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/mK]
Platinum wire	71.6	256.8	21,450	130
Teflon coating	0.25	1.08	2200	1052.2

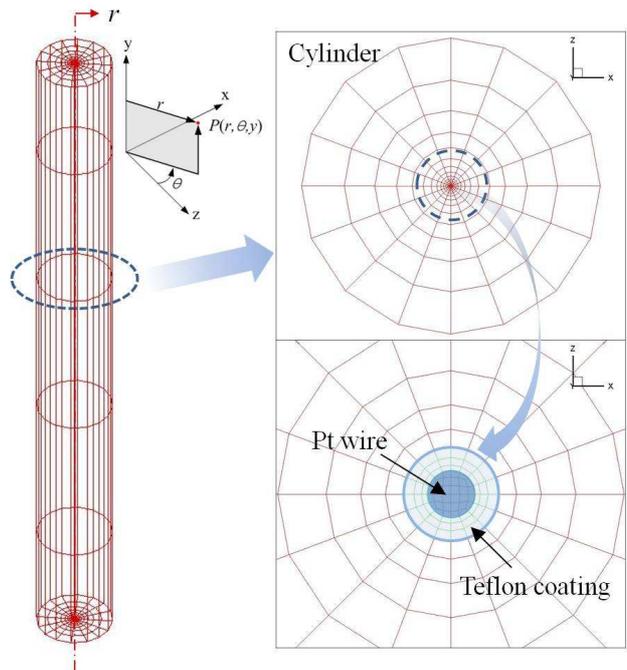


Fig. 2 Numerical model of a transient hot wire method

3) 열전도도

Maxwell Model (MM)⁽¹⁹⁾

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (11)$$

Jang and Choi Model (JCM)⁽²⁰⁾

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = (1-\phi) + K \frac{k_{nano,p}}{k_f} \phi + C_1 \frac{d_f}{d_p} Re_{d_p}^2 Pr \phi \quad (12)$$

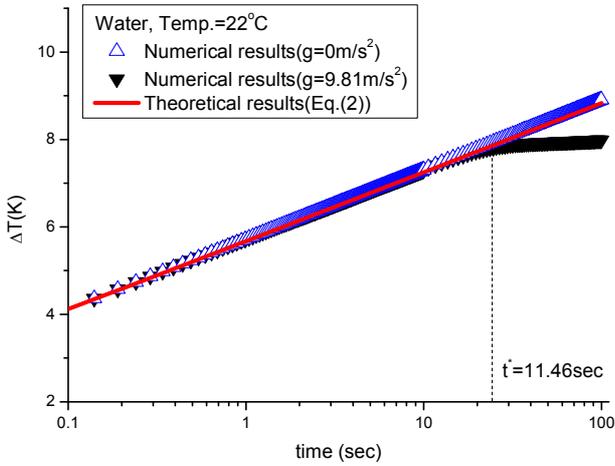


Fig. 3 Comparison between numerical and theoretical results

4) 점도(Pak&Cho 모델⁽²¹⁾)

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 1 + 39.11\phi + 533.9\phi^2 \quad (13)$$

3. 결과 및 토의

3.1 수치해석모델의 검증

수치해석모델의 검증을 위하여, 기본유체인 물에 대하여 수치적으로 구한 열선의 온도증가값 (ΔT)을 이론식인 식 (2)와 비교해 보았다. Fig. 3에서 보이듯, 중력이 고려되지 않은 경우(1 차원)의 수치해석결과는 절연된 열선을 고려한 이론식인 식 (2)와 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 또한 이 결과는 시간에 따라 무한히 증가하는 것을 볼 수 있다.

하지만 중력이 고려된 수치해석의 결과(2 차원)는 일정시간이 지난 후에 특정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 즉, 자연대류 발생으로 인하여 열선의 온도는 더 이상 증가하지 않고 정상상태를 이루게 된다. 중력의 영향을 자세히 파악해 보기 위하여 충분히 긴 시간이 지난 후에($t=100\text{sec}$) 해석공간의 온도 및 속도장을 확인해 보았다. Fig. 4에서 보이듯이 중력이 없는 경우, 온도 및 속도장은 열선 주변으로 균일하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 하지만 중력이 고려된 경우에는 측정 유체 내부에서 유동이 발생하여 해석공간의 상단에서 상대적으로 고온의 유체가 모이고, 속도도 더욱 빠른 것을 볼 수 있다.

3.2 나노유체의 자연대류 시작점

수치적인 결과에 의한 자연대류의 시작점은 $g =$

Table 3 Critical Rayleigh number and onset time of natural convection

	Water	$\phi=1\%$		$\phi=4\%$		$\phi=10\%$	
		MM	JCM	MM	JCM	MM	JCM
t^* (sec)	11.5	13.4	12.7	20.6	19.8	41.6	37.4
Ra^* (10^7)	85.3	58.6	60.1	24.0	27.0	7.31	9.76

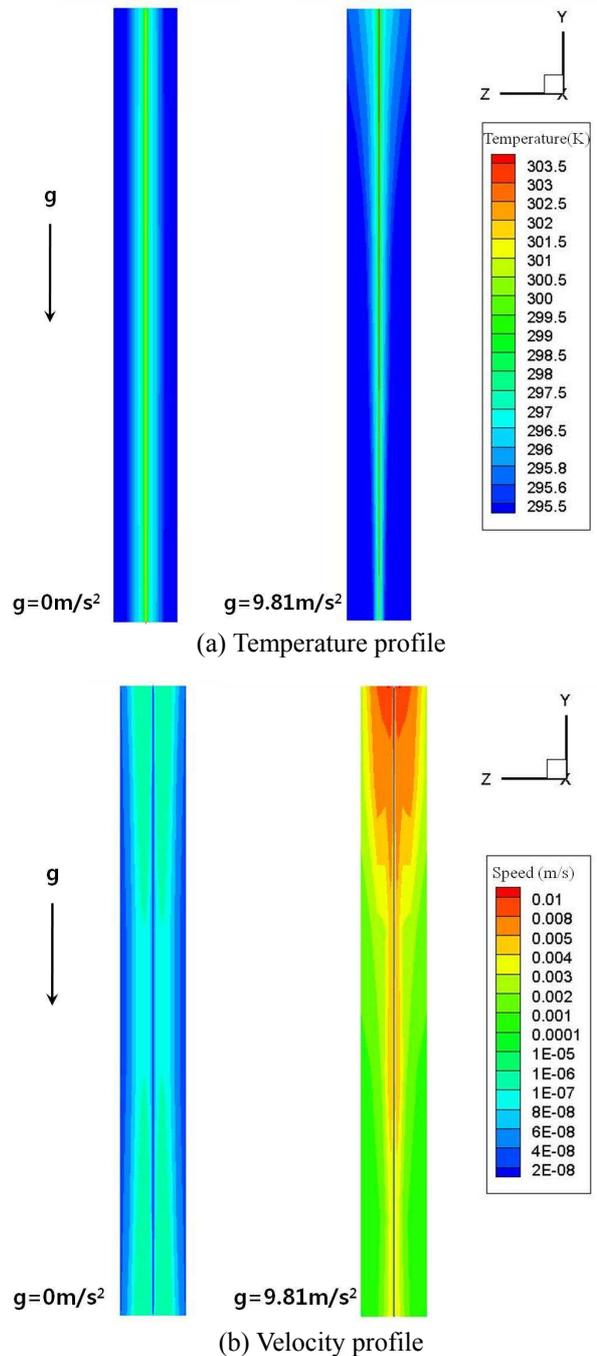


Fig. 4 Temperature and velocity profiles under the different gravity field (at $t=100\text{sec}$)

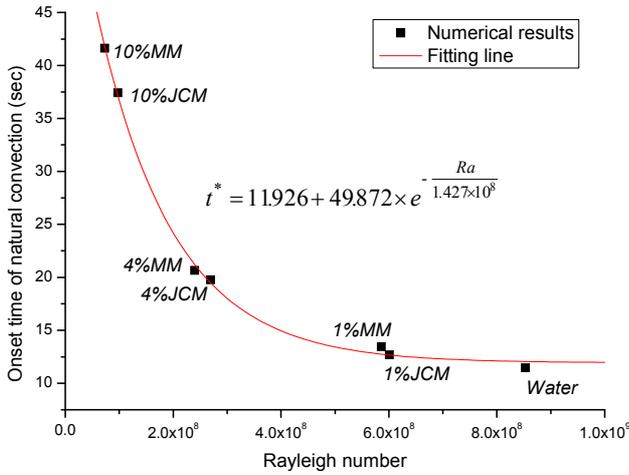


Fig. 5 Rayleigh number versus onset time of natural Convection

0 m/s² (1-Dimension) 인 경우와 g=9.81m/s² (2-Dimension)인 경우의 온도증가값(ΔT)의 차가 0.1% 이상이 발생하는 때로 정의할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 이와 같은 판단기준에 의하여 계산된 결과값은 Table 3 에 정리 되어 있다. 자연대류는 기본 유체인 물이 11.5 초로 가장 빨리 발생하고 10% 부피비의 Maxwell 모델로 열전도도를 예측한 물기반 알루미늄 나노유체인 경우가 41.6 초로 가장 늦게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 부피비가 증가함에 따라 증가한 점도 및 열전도도의 영향으로 파악할 수 있다. 마지막으로 본 연구의 수치해석적인 결과를 일반화하기 위하여 Rayleigh 수를 계산해 보았다. Rayleigh 수는 자연대류의 특성을 나타내주는 중요한 무차원수로서 특성길이의 선택이 매우 중요하다.

$$Ra(t) = \frac{g\beta\Delta T L_{ch}^3}{\alpha_f \nu_f} \quad (14)$$

비정상 열선법의 열선은 Thin cylinder 로 볼 수 있으므로 특성 길이 L_{ch} 는 열선의 길이 L 로 선정할 수 있다.⁽²²⁾ 따라서 수치적으로 구한 온도증가값(ΔT) 이용하면 Ra 수를 계산할 수 있으며, Table. 3 에 부피비에 대한 Ra 수가 정리되어있다. 또한 Fig. 5 에 보이듯 자연대류 개시점과 Ra 수에 대한 상관관계식은 다음과 같이 세울 수 있다.

$$t^* = 11.926 + 49.872 \times e^{-\frac{Ra}{1.427 \times 10^8}} \quad (15)$$

(7.31 × 10⁷ < Ra < 8.53 × 10⁸)

따라서, 7.31 × 10⁷ < Ra < 8.53 × 10⁸ 범위 내에서 나노유체의 Ra 수를 알 수 있다면 자연대류개시점을

구할 수 있게 된다. 하지만 여기서 Ra 수 안에 있는 ΔT 를 계산하기 위해서는 자연대류 개시점의 시간값(t*)이 필요한데 식 (2)를 이용한다면 음함수 형태(implicit equation)로 자연대류의 개시점을 구할 수 있게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 절연된 열선을 사용한 비정상 열선법을 이용하여 열전도도를 측정할 시 나노유체의 자연대류의 개시점을 파악하기 위하여 물-기반 알루미늄 나노유체 부피비 1, 4, 10%에 대하여 수치적인 해석을 수행하였다. 해석결과를 살펴보면 자연대류의 개시점은 물의 경우 11.5 초이고, 10% Maxwell 모델로 예측한 물기반 나노유체의 경우가 41.6 초로 부피비가 증가할수록 열전도도 및 점도의 증가로 인해 자연대류 개시점이 늦춰지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 비정상 열선법을 이용하여 열전도도를 측정할 때, 기본유체의 자연대류 개시점 이전에 측정이 이루어진다면 나노유체의 열전도도 측정시 자연대류가 측정오차에 미치는 영향은 무시할 수 있게 된다. 또한 이러한 결론은, 나노유체가 입자의 함량이 높을 수록 안정성이 높아져 자연대류의 발생이 늦게 일어난다는 기존 문헌의 결론⁽²³⁾과 일치한다. 또한 제한된 범위 (7.31 × 10⁷ < Ra < 8.53 × 10⁸)에서 자연대류 개시점과 Rayleigh 수에 대한 상관관계식을 제시하였으며 이 식을 이용한다면 임의의 Rayleigh 수에 대한 자연대류 시작점을 파악할 수 있다.

본 논문의 결과는 상온에서 연구된 결과로서, 만약 온도가 증가 한다면 유체의 열팽창계수 증가 및 점도의 감소로 인해 자연대류가 상온에서 보다 빨리 발생하게 된다. 그러나 온도가 변화하더라도 같은 온도에서 나노유체는 기본유체대비 높은 열전도도와 점도로 인하여 자연대류가 늦게 발생하게 된다. 따라서 각 온도에서 기본유체의 자연대류 발생시점 이전에 측정이 완료된다면 자연대류가 열전도도 측정 오차에 미치는 영향은 무시할 수 있게 된다. 그러나 실제 실험에서는 열선의 기울어짐이나 장력 정도, 외부 간섭 등의 영향으로 인해 수치적인 결과보다도 자연대류가 먼저 발생하기 때문에 실제 실험에서는 측정 운용구간에 대한 세밀한 보정이 필요할 것이다.

후 기

이 논문은 2008 년 한국에너지기술연구원 지원

과제인 에너지자원기술개발사업의 (2008-E-CM-11-P-08-3-010-2008) 지원에 의하여 연구된 결과이며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, S. U. S., 2009, "Nanofluids: From Vision to Reality Through Research," *Journal of Heat Transfer Trans. of the ASME*, Vol. 131, No. 3, pp. 033106-1-033106-9.
- (2) Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *Journal of Heat Transfer, Trans. of the ASME*, Vol. 121, No. 2, pp. 280~289.
- (3) Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Thompson, L. J. and Lee, S., 1997, "Enhanced Thermal Conductivity Through the Development of Nanofluids," *Proceeding of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II*, Material Research Society, Boston, 1997, Vol. 457, pp. 3~11.
- (4) Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F. and Wu, Q., 2002, "Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles," *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 7, pp. 4568~4572.
- (5) Zhang, X., Gu, H. and Fujii, M., 2006, "Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids Containing Spherical and Cylindrical Nanoparticles," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100 No.4, pp. 044325.
- (6) Li, C. H., Williams, W., Buongiorno, J., Hu, L.-W. and Peterson, G. P., 2008, "Transient and Steady-State Experimental Comparison Study of Effective Thermal Conductivity of Al₂O₃/Water Nanofluids," *Journal of Heat Transfer Trans. of the ASME*, Vol. 130, No. 4, pp. 042407.
- (7) Beck, M. P., Yuan, Y., Warriar, P. and Teja, A.S., 2010 "The Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids in Water, Ethylene Glycol, and Ethylene Glycol+Water Mixtures," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 12, No. 4, pp.1469~1477.
- (8) Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L. and Choi, S. U. S., 2008, "Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 29., No. 5, pp.432~460.
- (9) Buongiorno, J. et al., 2009, "A Benchmark Study on the Thermal Conductivity of Nanofluids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, No. 9, pp. 094312.
- (10) Stalhane, B. and Pyk, S., 1931, "The New Method for Determining the Coefficients of Thermal Conductivity," *Technisk Tidskrift*, Vol. 61, p. 389.
- (11) Wakeham, W. A., Nagashima, A. and Sengers, J. V., 1991, *Measurement of the Transport Properties of Fluids*, Blackwell Science, London, Chap. 7.
- (12) Healy J. J., de Groot J. J. and Kestin, J., 1976, "The Theory of the Transient Hot-Wire Method for Measuring Thermal Conductivity," *Physica*, Vol. 82, No. 2, pp. 392~408.
- (13) Assael, M. J., Karagiannidis, L., Malamataris, N. and Wakeham, W. A., 1998, "The Transient Hot-Wire Technique: A Numerical Approach," *International Journal of Thermophysics*, Vol. 19, No. 2.
- (14) Mohammadi, S. S., Graboski, M. S. and Sloan, E. D., 1981, "A Mathematical Model of a Ramp Forced Hot-Wire Thermal Conductivity Instrument," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, No. 4, pp. 671~683.
- (15) Rusconi R., Williams, W. C., Buongiorno, J., Piazza, R. and Hu, L.-W., 2007, "Numerical Analysis of Convective Instabilities in a Transient Short-Hot-Wire Setup for Measurement of Liquid Thermal Conductivity," *Int. J. Thermophys.*, Vol. 28, No. 4.
- (16) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London.
- (17) Nagasaka, Y. and Nagashima, A., 1981, "Absolute Measurement of the Thermal Conductivity of Electrically Conducting Liquids by the Transient Hot-Wire Method," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 14, No. 12, pp. 1435~1440.
- (18) Zhou, S.-Q. and Ni, R., 2008, "Measurement of the Specific Heat Capacity of Water-Based Al₂O₃ Nanofluid," *Applied Physics Letter*, Vol. 92, No. 9, pp. 093123.
- (19) Maxwell, J. C., 1873, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford University Press, London, 1st ed., pp. 360~366.
- (20) Jang, S. P. and Choi, S.U.S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Applied Physics Letter*, Vol. 84, No.21, pp. 4316~4318.
- (21) Pak, B. C. and Cho, Y. I., 1998, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, No. 2, pp. 151~170.
- (22) Bejan, A., 2004, *Convection Heat Transfer*, John Wiley&Sons, 3rd ed., p.222.
- (23) Hwang, K. S., Lee, J.-H., Jang, S. P., 2007, "Buoyancy-Driven Heat Transfer of Water-Based Al₂O₃ Nanofluids in a Rectangular Cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 19-20, pp.4003~4010.