

나노유체의 부력에 의한 대류 불안정성 및 자연대류 열전달 특성 해석

김 제 익, 강 용 태*, 최 창 균

서울대학교 응용화학부, *경희대학교 기계산업시스템공학부

Analysis of Convective Instability Induced by Buoyancy and Heat Transfer Characteristics for Natural Convection in Nanofluids

Jake Kim, Yong Tae Kang*, Chang Kyun Choi

School of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

*School of Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyung Hee University, Kyung-gi 449-701, Korea

(Received February 17, 2004; revision received June 9, 2004)

ABSTRACT: The objective of the present study is to investigate the convective instability driven by buoyancy and the heat transfer characteristics of nanofluids. Using the property relations of nanofluid expressed as a function of the volume fraction of nanoparticles, the ratio of nanofluid Rayleigh number to basefluid one, f is newly defined. The results show that the density and the heat capacity of nanoparticles act as a destabilizing factor. With an increase of γ which is the ratio of thermal conductivity of nanoparticles to that of basefluid, the thermal instability of nanofluid decreases but the heat transfer rate increases.

Key words: Instability(불안정성), Heat transfer(열전달), Nanofluids(나노유체)

기 호 설 명

C : 상수, 식(13)

C_p : 열용량 [W/kgK]

d : 유체층의 두께 [m]

f : 나노유체 특성인자, Ra_{nf}/Ra_f

g : 중력가속도 [m/s^2]

h : 열전달계수 [W/m^2K]

k : 열전도도 [W/mK]

m : 지수, 식(13)

n : 형상인자

Nu : Nusselt 수, hd/k

Ra : Rayleigh 수, $(g\alpha d^3/\nu)\Delta T$

T : 온도 [K]

그리스 문자

α : 부피 팽창계수 [$1/K$]

γ : 열전도도비, k_p/k_f

δ_1 : 밀도비, ρ_p/ρ_f

δ_2 : 부피 기준 열용량비, $(\rho C_p)_p/(\rho C_p)_f$

x : 열확산계수비 [m^2/s]

μ : 점도 [$Pa\cdot s$]

ν : 동점도 [m^2/s]

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-201-8106

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

ρ : 밀도 [kg/m³]
 ϕ : 나노입자의 부피분율

하첨자

c : 입계상태
 f : 모유체
 nf : 나노유체
 p : 나노입자

1. 서 론

최근 들어 유체의 유동성과 고체의 고 열전도도를 갖는 첨단유체 개발을 위한 시도들이 많이 수행되어 왔다. 그중 금속입자 첨가로 인한 열전도도 향상에 대한 연구가 주로 시도되었다. 그런데 유체 속의 입자가 침전, 부식, 연마, 기계고장, 과도한 압력강하 등을 일으켜 유체의 성질을 많이 저하시키는 문제를 발생시켰다. 최근 나노기술과 계면공학의 발전으로 100 nm 이하의 나노입자를 모유체에 안정하게 분산시켜 기존의 문제를 해결한 나노유체가 개발되었다.⁽¹⁻⁶⁾

Choi⁽¹⁾는 구리, 알루미늄 나노입자를 이용한 나노유체에서 열전달 증가현상을 보고한 이후, 금속산화물 입자의 열전도도 증가에 미치는 영향,⁽²⁾ 구리 나노입자와 에틸렌 글리콜을 모유체로 하는 나노유체의 열전도도 측정⁽³⁾ 등 일련의 여러 나노유체에 대한 열전도도 측정 수행하였다. 최근에는 Koblinski et al.⁽⁴⁾과 함께 나노유체의 과대 열전도도 증가 메커니즘을 이론적으로 분석하였다. Xuan and Li⁽⁵⁾와 Wang et al.⁽⁶⁾은 다양한 나노유체에 대한 열전도도 측정실험을 통하여 나노입자가 열전도도를 10% 이상 향상시킨다고 보고한 바 있다. Lee et al.⁽⁷⁾은 암모니아/물계에서 나노유체 특성연구를 통하여 나노입자가 열 및 물질전달에 미치는 영향과 은 나노입자를 이용한 나노유체의 열전도도 측정실험을 수행하였다. 실용적 견지에서 Li and Xuan⁽⁸⁾은 구리/물 나노유체의 튜브에서의 열전달 실험을 수행하여 대류 열전달계수가 60% 정도 급증한다는 사실을 보고하였다. 이는 나노입자에 의한 열전도도 증가만으로는 설명되지 않으며 대류 발생시 나노유체는 기존의 유체와는 다른 열전달 특성을 갖는다는 것을 의미한다.

나노유체에 대한 실험적 연구는 자연대류⁽⁹⁾와 강제대류 및 비등 열전달 실험까지 진행되어 있는 상태이다. 반면 현재 연구들은 나노유체의 열전도도 측정에 편중되어 있으며 열전도도 증가현상의 이론적 연구는 아직 미흡한 상황이다.

본 연구에서는 흡수식 냉동기에 나노유체를 적용하기 위하여 선형 안정성 이론을 도입하여 나노유체 대류 안정성을 해석하고, 자연대류 열전달 특성을 이론적으로 고찰하여 나노유체의 열유동 특성을 파악하는 데 목적이 있다. 본 연구의 결과는 흡수식 작동유체인 이성분혼합물에 적합한 나노입자를 선정하는 데 지표가 될 것으로 기대된다.

2. 선형 안정성 이론 및 자연대류 해석

수평 유체층의 하부면을 가열하거나 상부면을 냉각하면, 부력에 의한 자연대류가 발생한다는 사실은 잘 알려져 있다. Rayleigh 경⁽¹⁰⁾은 각 물리량들을 기본량과 무한소 교란량의 합으로 나타낸 후, 교란량들의 제곱차 이상의 항들을 소거하여 계를 선형화시키는 선형 안정성 이론을 도입하여 대류 발생 임계조건을 구하였다. 각 경계조건에 따른 대류 임계조건은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned} &657.5 \text{ (free-free boundaries)} \\ Ra_c &= 1101 \text{ (rigid-free boundaries)} \quad (1) \\ &1708 \text{ (rigid-rigid boundaries)} \end{aligned}$$

여기서 Rayleigh 수 Ra 는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra = \frac{g\alpha\Delta T}{\nu} \Delta T \quad (2)$$

Rayleigh 수는 불안정화 요인인 부력과 안정화 요인인 확산력들 사이의 비를 의미하며, 대류 불안정성 및 열전달 해석에 있어서 매우 중요한 척도이다. 두 고정 경계면을 갖는 수평 유체층에서의 열전달 상관식을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Correlations for free convection⁽¹²⁾

$Ra(\times 10^{-3})$	Correlations
1.7~6	$Nu=0.012 Ra^{0.6}$
6~37	$Nu=0.375 Ra^{0.2}$
37~10 ⁵	$Nu=0.13 Ra^{0.3}$
10 ⁵ 이상	$Nu=0.057 Ra^{1/3}$

3. 나노유체 해석

모유체(basefluid)에 나노입자를 분산시키면 모유체의 열전도도뿐만 아니라 다른 많은 물성치들이 변한다. 따라서 나노유체의 대류 불안정성 및 자연대류 열전달 특성을 해석하기 위해서는 나노유체의 열 및 유동특성을 나타내는 물성치들의 나노입자 부피분율에 따른 상관식을 구하는 것이 매우 중요하다.

무차원 밀도와 무차원 부피 기준 열용량은 다음과 같이 나노입자의 부피분율에 대하여 선형 관계식으로 주어진다.⁽¹³⁾

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} = (1 - \phi) + \phi \delta_1 \quad (3)$$

$$\frac{(\rho C_p)_{nf}}{(\rho C_p)_f} = (1 - \phi) + \phi \delta_2 \quad (4)$$

점도는 나노입자의 부피분율에 따라 증가하며 다음과 같이 표현된다.

Einstein's equation

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = (1 + 2.5\phi) \quad (5)$$

Brinkman's equation

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (6)$$

여기서 Einstein 식은 일반식인 Brinkman 식의 저농도 영역에 대한 극한의 경우이다.

열전도도에 대해서는 현재 나노유체에 대한 이론식은 전무한 상태이며, 마이크로 단위의 입자들에 대해서는 Hamilton-Crosser(H-C)식이 잘 맞는다고 알려져 있다.⁽¹⁴⁾

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{\gamma + (n-1) - (n-1)\phi(1-\gamma)}{\gamma + (n-1) + \phi(1-\gamma)} \quad (7)$$

위의 관계식은 Fig. 1에 도시된 것처럼 Eastman et al.⁽³⁾의 구리 나노입자를 이용한 나노유체 열전도도 측정실험 결과와 매우 큰 차이를 나타내고

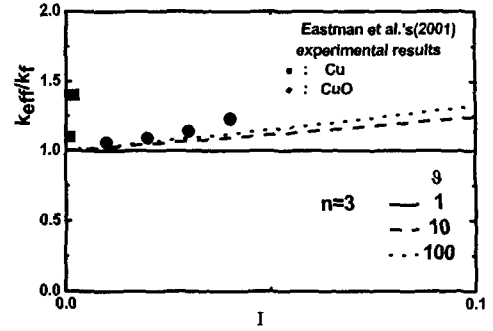


Fig. 1 Comparison of H-C equation and Eastman et al's results.

있으며, 따라서 H-C 식은 나노유체에 일반적 적용이 가능하지 않음을 알 수 있다. 그런데 일반적으로 나노유체의 열전도도 향상 정도는 H-C 식보다 크므로 본 연구에서는 H-C 식을 적용하여 나노입자에 의한 자연대류 불안정성 및 열전달 특성의 변화 하한치를 제시하고자 한다.^(2,3,6,7)

부력의 효과를 나타내는 온도에 따른 팽창계수를 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = -\frac{d\rho/\rho_0}{dT} \quad (8)$$

이 정의를 식(3)에 적용하고, ϕ 가 온도에 무관하다고 하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\alpha_{nf} = (1 - \phi)\alpha_f + \phi\alpha_p \quad (9)$$

일반적으로 $\alpha_f \gg \alpha_p$ 이므로 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{nf} = (1 - \phi)\alpha_f \quad (10)$$

위 식은 물리적으로 나노유체가 가열될 때 모유체의 부피증가에 의해서 자연대류가 발생하며 나노입자는 거의 기여하지 못함을 의미한다.

식(3)~(10)들로부터 나노유체의 Rayleigh 수를 모유체의 Rayleigh 수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$Ra_{nf} = \frac{g\alpha_{nf}d^3}{\chi_{nf}\nu_{nf}} \Delta T \quad (11)$$

여기서 인자 f 는 점도에 대하여 Brinkman 식을 적용한 경우 다음과 같이 $\delta_1, \delta_2, \gamma, \phi$, 그리고 n 의 함수로 표현된다.

$$f = \frac{\gamma + (n-1) + \phi(1-\gamma)}{\gamma + (n-1) - (n-1)\phi(1-\gamma)} (1-\phi) \times \{(1-\phi) + \delta_1\phi\} \{(1-\phi) + \delta_2\phi\} \times (1-\phi)^{2.5} \quad (12)$$

한편 자연대류에서 열전달 상관식은 다음과 같이 표현된다.⁽¹²⁾

$$Nu = CRa^m \quad (0.2 < m < 0.6) \quad (13)$$

위 식에 식(11)을 대입하면 다음의 나노유체 열전달 특성을 나타내는 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{h_{nf}}{h_f} = f^m \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \quad (14)$$

최도 f 는 나노입자 첨가에 의한 모유체의 대류 불안정성과 열전달 특성의 변화를 나타내는 척도로, 예를 들어 f 가 2인 경우 주어진 조건에서 나노유체는 모유체에 비해 절반의 온도구배(ΔT)로도 자연대류가 발생하며, 또한 열전달계수는 열전도도비가 동일한 경우 2^m 만큼 증가함을 뜻한다. 식(12)와 식(14)를 이용하여 주어진 조건에 따라 각 인자들의 영향을 조사할 수 있다.

4. 결과 및 토론

우선 나노유체의 물성특성을 나타내는 인자들, $\delta_1, \delta_2, \gamma$, 그리고 n 의 변화에 따른 나노유체의 대류 안정성 및 열전달 특성을 나타내는 척도 f 의 변화를 식(12)를 이용하여 조사하였다. 계산에 사용된 수치는 $\delta_1=10, \delta_2=0.7, \gamma=700$, 그리고 $n=3$ 기본값으로 선택하였다. 선택 기준은 현재 사용되고 있는 나노입자 중 하나인 구리와 은, 그리고 모유체인 물의 물성치를 적용한 것으로 그 값들을 Table 2에 정리하였다. 우선 모유체와 나노입자 간의 밀도비를 의미하는 δ_1 의 영향을 Fig. 2에 도시하였다. 기준값($\delta_1=10$)에서는 부피

Table 2 Properties of basefluid and particles⁽¹²⁾

	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	k (W/mK)	γ	δ_1	δ_2
H ₂ O	997	4,180	0.607	-	-	-
Cu	8,933	385	401	661	8.96	0.83
Ag	10,500	235	429	714	10.5	0.59

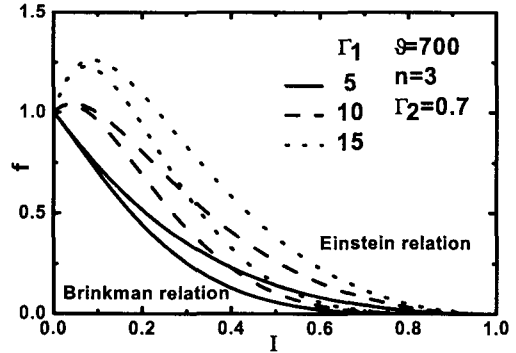


Fig. 2 f vs. ϕ for various δ_1 .

분율이 증가함에 따라 f 가 $\phi=0.04$ 근방에서 최대값을 갖고 이후 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 적은 양의 나노입자를 첨가함으로써 자연대류를 쉽게 발생시킬 수 있음을 의미한다. 그런데 $\delta_1=5$ 인 경우에는 ϕ 가 증가함에 따라 f 가 단조 감소하는 경향을 보이며 이는 앞서와 반대로 나노입자가 계를 안정화시킨다고 할 수 있다. 이러한 특성은 현실적으로 금속산화물계 나노유체에서 나타나며 최근 자연대류 열전달 실험⁽⁹⁾ 결과 첨가된 나노입자가 유동발생을 저해한다는 사실을 정성적으로 설명하고 있다. f 값은 Einstein 식을 사용한 경우가 Brinkman 식을 사용한 경우보다 동일한 조건에서 언제나 높은 값을 나타내었다. 그런데 Einstein 식의 적용범위 $\phi < 0.05$ 에서는 두 값이 거의 일치함을 보이고 있어 저농도 영역에서는 선형적인 Einstein 식을 사용할 수 있음을 결론 내릴 수 있다.

Fig. 3에는 부피 기준 열용량비 δ_2 의 영향을 도시하였으며, δ_2 의 값이 커질수록 계를 불안정화 시킴을 알 수 있다. 열전도도비 γ 의 f 에 대한 영향을 Fig. 4에 나타내었다. γ 가 10 이하에서는 γ 에 증가함에 따라 f 가 급격히 감소하다가 그 이

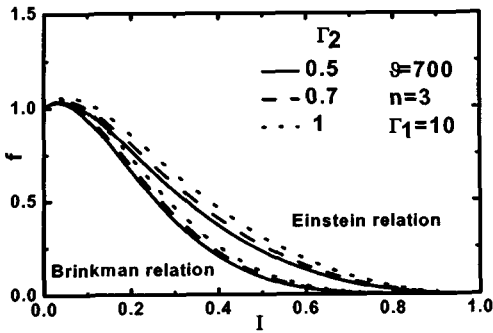


Fig. 3 f vs. ϕ for various δ_2 .

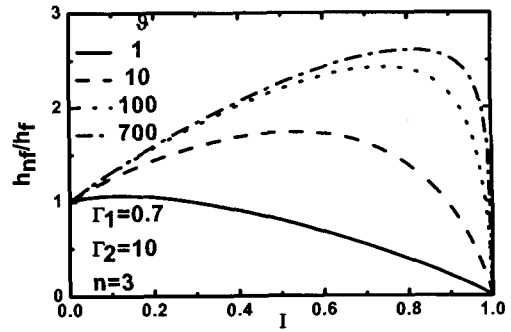


Fig. 5 Heat transfer ratio of h_{nf} to h_f vs. ϕ for various γ .

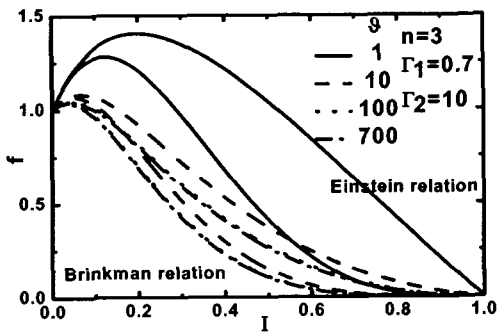


Fig. 4 f vs. ϕ for various γ .

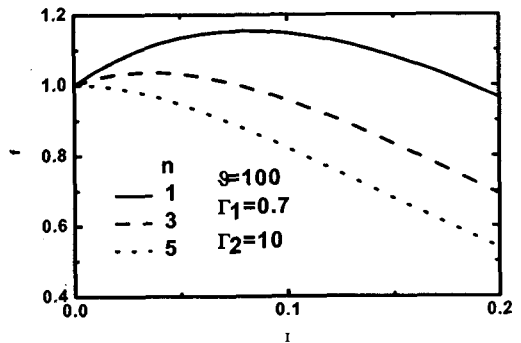


Fig. 6 f vs. ϕ for various n with $m=0.25$.

후에는 서서히 감소하는 경향을 보였다. 이는 γ 가 계를 안정화시킨다는 것을 의미하며 물리적으로 열전도도가 낮은 나노입자일수록 계를 더 쉽게 불안정화시킨다는 것을 의미한다. 이는 열전도도가 큰 입자를 분산시켜 나노유체의 열전도도를 향상시킨다는 기존의 연구목적과 현상적으로 배치되며, 보다 명확한 γ 가 열전달에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 식(14)를 조사하였다. 이를 Fig. 5에 나타내었는데, 그림에서 보이는 것처럼 γ 가 증가함에 따라 대류 열전달계수의 비가 증가함을 알 수 있다. 위의 두 결과로부터 입자의 열전도도가 클수록 자연대류 발생이 저해되는 반면 자연대류에 의한 열전달 성능 촉진은 활발히 일어난다는 결론을 내릴 수 있다.

형상인자 n 의 영향을 Fig. 6에 도시하였으며, 결과 형상인자가 커질수록 그 값이 작아지며 이는 물리적으로 튜브형상의 나노입자가 계를 쉽게 불안정화시킴을 의미한다.

5. 결 론

본 연구는 나노입자가 모유체의 물성을 변화시켜 나노유체의 대류 불안정성과 자연대류 열전달 특성에 미치는 영향을 해석한 것이다. 연구결과 얻어진 결론은 다음과 같다

- (1) 모유체에 대한 나노유체의 대류 안정성과 열유동 특성을 나타내는 척도 f 를 얻었으며 그 값이 1보다 큰 경우는 계를 불안정화시킨다는 것을 의미한다.
- (2) 기준값을 적용한 해석결과에서는 임계 이하의 부피분율에 대하여 δ_1 과 δ_2 는 불안정화 요인으로 작용하였다. 그러나 $\delta_1=5$ 인 경우는 안정화 요인으로 작용하였다.
- (3) 점도의 부피분율에 대한 관계식인 Einstein 식과 Brinkman 식을 적용하여 비교한 결과 낮은 부피분율에서는 둘이 거의 일치함을 알 수 있다.
- (4) 열전도도비를 나타내는 γ 는 그 값이 클수

록 계가 쉽게 안정화되나 자연대류 열전달 성능은 촉진됨을 알 수 있다.

이상의 결론은 이론적 해석을 통해 얻은 것으로 나노유체 열전도도 관계식에 대한 보정이 이루어져야 한다. 그럼에도 본 연구는 나노입자의 종류 및 부피분율에 따른 나노유체의 열유동 특성 변화에 대한 이론적 배경을 제시하고 또한 하한치를 제시한 것으로 후행 연구에 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원사업(과제번호 : KRF-2003-041-D00113)의 지원으로 수행되기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Choi, U. S., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Development and Applications of Non-Newtonian Flows*, ed. by Singer, D. A. and Wang, H. P., FFD-Vol. 231/MD-Vol. 66, ASME New York, pp. 474-480.
- Lee, S., Choi, U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *J. of Heat Transfer*, Vol. 212, pp. 280-289.
- Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W. and Thompson, L. J., 2001, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *App. Phys. Lett.*, Vol. 78, pp. 718-720.
- Kebllinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., 2002, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855-863.
- Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, *Int. Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58-64.
- Wang, B.-X., Zhou, L.-P. and Peng, X.-F., 2003, A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2667-2672.
- Lee, C. H., Kang, S. W., Cho, S.-J., Nam, S.-B., Kim, T.-H. and Kim, S.-H., 2003, Study on Ag nano-particle for ammonia absorption refrigeration systems, *Proc. of the SAREK 2003 Summer Annual Conf.*, pp. 761-765.
- Li, Q. and Xuan, Y., 2002, Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid, *Science in China Series E; Technological Science*, Vol. 45, pp. 408-416.
- Putra, N., Roetzel, W. and Das, S. K., 2003, Natural convection of nano-fluids, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 775-784.
- Lord Rayleigh, 1916, On convection current in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side, *Philos. Mag.*, Vol. 32, pp. 529-546.
- Drazin, P. G. and Reid, W. H., 1981, *Hydrodynamic Stability*, Cambridge University Press, London, pp. 50-52.
- Çengel, Y. A., 1998, *Heat Transfer: A Practical Approach*, WCB/McGraw-Hill, New York, p. 423.
- Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, Conceptions for heat transfer correlations of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707.
- Hamilton, R. L. and Crosser, O. K., 1962, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *I&EC Fundamentals*, Vol. 1, pp. 182-191.