

Soret 효과를 고려한 이성분 나노유체에서의 대류 불안정성 해석

김 제 익, 정 청 우*, 강 용 태** , 최 창 균
 서울대학교 응용화학부, *경희대학교 기계산업시스템 공학부

Soret effect on the convective instability in binary nanofluids

Jake Kim, Chung Woo Jung*, 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, Yong In, Gyeong-gi 449-701, Korea

(Received August 9, 2004 ; revision received January 12, 2005)

ABSTRACT: The objective of the present study is to study the Soret effect of both nanoparticles and solute on the convective instabilities in binary nanofluids. A new stability criterion is obtained based on the linear stability theory. The results show that the Soret effect of solute (ψ_{bp}) makes the binary nanofluids unstable significantly and the convective motion in a binary nanofluid sets in easily as the ratio of Soret coefficient of nanofluid to that of binary basefluid δ_4 increases for $\delta_4 > -1$. It is also found that as an increase of the volume fraction of nanoparticles, nanofluid becomes stable but at a separation ratio of $\psi = -0.3$ the state of fluid changes from stable to unstable.

Key words: Stability(안정성), Soret effect(열확산 효과), Binary nanofluids(이성분 나노유체)

기호설명

a : 무차원 파수
 C : 농도 [kg/m³]
 C_p : 열용량 [W/kgK]
 d : 유체층의 두께 [m]
 D : 미분 연산자, d/dz
 D : 물질 확산 계수 [m²/s]
 g : 중력가속도 [m/S²]
 k : 열전도도 [W/mK]
 Le : Lewis 수, a/D

Ra : Rayleigh 수, $\frac{g\beta_T d^3}{a\nu} \Delta T$
 Ra_a : 물질 Rayleigh 수, $\frac{g\beta_s d^3}{D\nu} C_{s,i}$
 P : 압력 [Pa]
 S : Soret 계수 [kg/m³]
 Sc : Schmidt 수, ν/D
 T : 온도 [K]
 U : 속도 [m/s]

그리스 문자

α : 열 확산 계수 [m²/s]
 β_s : 밀도 팽창 계수, $\partial(\rho/\rho_R)/\partial C$ [m³/kg]
 β_T : 온도 팽창 계수, $\partial(\rho/\rho_R)/\partial T$ [K⁻¹]

† Corresponding author

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

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

- δ_1 : 밀도비, $\frac{\rho_p}{\rho_f}$
- δ_3 : 물질 확산 계수의 비, D_{np}/D_{bf}
- δ_4 : Soret 계수의 비, $(DS)_{np}/(DS)_{bf}$
- ϕ : 나노입자의 부피 분율
- ϕ_1 : 무차원 교란 농도, $C_1/C_{s,i}$
- ϕ_w : 나노입자의 질량 분율
- μ : 점도 [Pa · s]
- ν : 동점도 [m²/s]
- θ_1 : 무차원 교란 온도, $T_1/\Delta T$
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- τ : 무차원 시간, $d^2/t/D$
- ψ : 분리 비, $(DS)\beta_s/(DT_R\beta_T)$

하첨자

- bf* : 모유체
- i* : 초기 상태
- np* : 나노 입자
- R* : 기본상태
- S* : 용질
- T* : 온도
- w* : 질량

1. 서론

나노입자를 모유체에 안정하게 분산시킨 나노유체의 열전달 특성이 매우 우수하다는 사실이 보고된 이후, 이에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다.⁽¹⁻¹¹⁾ 특히 1) 나노유체의 열전도 메커니즘⁽¹⁻⁷⁾, 2) 나노유체의 대류 열전달 특성⁽⁸⁻¹¹⁾, 그리고 3) 나노유체의 상변화 열전달 특성^(12, 13) 등에 대한 연구가 진행 중에 있다. 최근 Kim et al.⁽¹⁴⁾은 단상 모델을 기반으로 해서 나노유체 대류 불안정성에 대한 해석을 시도하였으며, 이를 기반으로 관내 열전달 특성을 성공적으로 해석하였다.

나노유체의 공학적 응용을 목적으로 이성분 혼합물의 모유체에 나노입자가 분산되어 있는 이성분 나노유체의 제조가 시도되고 있다. 이성분 나노유체는 흡수식 냉동기에서의 작동유체, 환경물질 제거를 위한 시약, MEMS에 사용될 수 있는 고효율 열전달 매체, 작동기 전달을 위한 바

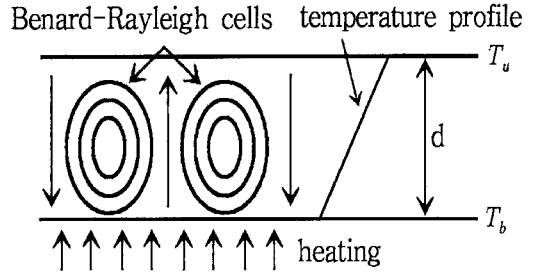


Fig. 1 Schematic diagram of the system.

이오 유체 등에 적용 가능하며 그 가능성이 검토되고 있다. 최근 Kang의 연구그룹은 이성분 나노유체의 분산 안정도 해석⁽¹⁵⁾, 기포 흡수기에서의 이성분 나노유체에 대한 암모니아 흡수 성능 측정⁽¹⁶⁾ 등 이성분 나노유체에 대한 실험적 연구뿐 아니라 이성분 나노유체에서의 대류 불안정성 해석⁽¹⁷⁾ 등 이론적 연구도 함께 수행하고 있다.

본 연구는 이성분 나노유체의 대류 불안정성 해석에 대한 연구를 확장한 것으로서 이성분계에서 특징적으로 관찰되는 열확산에 의한 물질 전달 현상인 Soret 효과가 대류 불안정에 미치는 영향을 고찰한 것이다.

2. 계의 구성

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 두께 d의 이성분 나노유체층의 하부면을 등온으로 가열하는 계를 구성하였다. 열유동 특성은 Boussinesq 가정을 따르며, 물질 확산은 Fick의 법칙을 따른다고 가정하였다. 이상의 가정을 적용하여 계의 지배식을 구성하면 다음과 같다.⁽¹⁸⁾

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \tag{1}$$

$$\rho_R \frac{D}{Dt} \vec{U} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{U} + \rho \vec{g} \tag{2}$$

$$\frac{D}{Dt} T = \frac{k}{(\rho C_p)} \nabla^2 T \tag{3}$$

$$\frac{D}{Dt} C = D \nabla^2 C + (DS) \frac{\nabla^2 T}{T_R} \tag{4}$$

$$\rho = \rho_R [1 - \beta_T (T - T_R) + \beta_s (C - C_R)] \tag{5}$$

여기서 미분 연산자 D/Dt 는 $\partial/\partial t + U \cdot \nabla$ 를 의미한다. 식 (4)의 우변 두 번째 항은 온도 구배에 의한 물질확산을 의미한다.

압력항이 소거된 무차원 교란 방정식은 다음과 같다.⁽¹⁹⁾

$$\left(\frac{1}{Sc} \frac{\partial}{\partial \tau} - \nabla^2\right) \nabla^2 w_1 = \nabla^2 (Ra_s \phi_1 - LeRa\theta_1) \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} - Le\nabla^2\right) \theta_1 = -w_1 \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial \tau} - \nabla^2\right) \phi_1 = -w_1 \frac{\partial \phi_0}{\partial z} + \phi Le \frac{Ra}{Ra_s} \nabla^2 \theta_1 \quad (8)$$

여기서 Soret 효과를 나타내는 무차원 인자인 ψ 는 다음과 같이 정의된다.⁽²⁰⁾

$$\psi = \frac{(DS)}{DT_R} \frac{\beta_s}{\beta_T} \quad (9)$$

이 때, 각 교란량들은 다음과 같은 정규형태로 표현될 수 있다.

$$[w_1, \theta_1, \phi_1] = [w^*(z), \theta^*(z), \phi^*(z)] \times \exp[i(a_x x + a_y y) + \sigma \tau] \quad (10)$$

식 (10)을 각 식에 대입하고, 안정성 교환의 원리를 적용하면 교란의 크기 함수로 구성된 다음과 같은 안정성 방정식을 얻을 수 있다.

$$(D^2 - a^2)^3 w^* = -LeRa a^2 \theta^* + Ra_s a^2 \phi^* \quad (11)$$

$$\leq (D^2 - a^2 \theta^* = -w^*) \quad (12)$$

$$(D^2 - a^2)(Ra_s \phi^* + LeRa\theta^*) = (\beta_s C_{s,i}) Raw^* \quad (13)$$

식 (12)와 (13)을 식 (11)에 대입하면 속도 교란 크기만의 함수로 구성된 방정식을 유도할 수 있다.

$$(D^2 - a^2)^3 w^* = \overline{Ra} a^2 w^* \quad (14)$$

여기서 수정된 Rayleigh 수 \overline{Ra} 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\overline{Ra} = (1 + \psi + \leq \beta_s C_s) Ra \quad (15)$$

식 (14)는 고전적인 선형안정성 이론에 의해

얻어진 방정식과 동일하며 양 경계를 고정경계면으로 갖는 경우, 임계값이 1708로 잘 알려져 있다. 식 (15)에서 우변의 두 번째 항은 Soret 효과를, 세 번째 항은 초기 농도 구배 효과를 각각 나타낸다.

3. 이성분 나노유체 해석

나노입자가 대류 불안성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 이성분 나노유체의 물성치를 모유체와 나노입자의 물성치로 표현한다.

이성분 나노유체의 농도 C는 용질의 농도 C_s와 나노입자의 농도 C_{np}의 합으로 표현할 수 있으며, 이로부터 다음과 관계식을 유도할 수 있다.

$$C_s = (1 - \phi_w)C \quad (16)$$

$$C_{np} = \phi_w C \quad (17)$$

여기서 ϕ_w 는 나노입자의 질량분율로 부피분율 ϕ 와는 다음의 관계에 있다.

$$\phi_w = \frac{\phi \delta_1}{(1 - \phi) + \phi \delta_1} \quad (18)$$

이 관계식을 식 (4)에 대입하여 정리하면 이성분 나노유체에서의 확산계수에 대한 상관식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$D = (1 - \phi_w)D_s + \phi_w D_{np} \quad (19)$$

다른 물성치들이 부피 분율 ϕ 의 선형함수로 주어지는 반면, 확산계수는 질량 분율 ϕ_w 의 선형 함수로 주어짐을 알 수 있다.

동일한 개념으로 Soret 효과를 나타내는 DS도 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\psi = \frac{(1 - \phi_w) + \phi_w \delta_4}{(1 - \phi_w) + \phi_w \delta_3} \psi_{bf} \quad (20)$$

여기서 δ_3 과 δ_4 는 D_{np}/D_s 와 $(DS)_{np}/(DS)_s$ 를 의미한다.

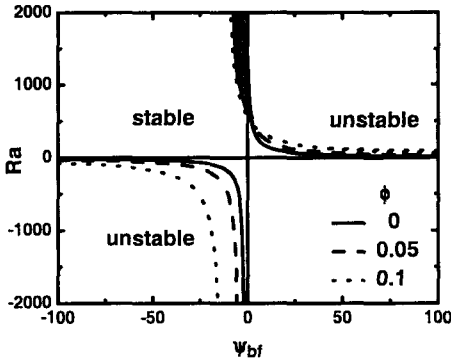


Fig. 2 Ra vs ψ_{bf} for various ϕ 's.

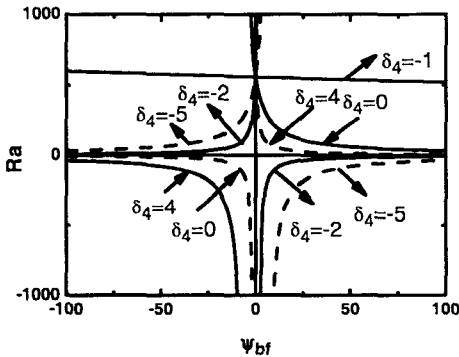


Fig. 3 Ra vs ψ_{bf} for various δ_4 's.

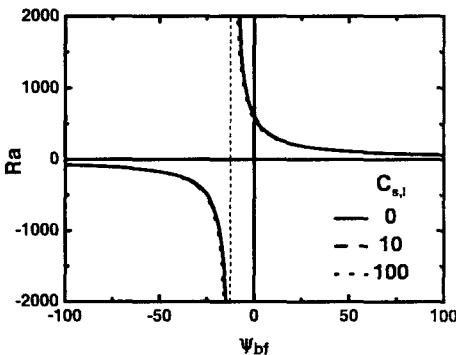


Fig. 4 Ra vs ψ_{bf} for various $C_{s,i}$'s.

4. 결과 및 토론

Table 1에 정리된 각 물성치를 이용하여 주요 인자들이 이성분 나노유체 대류 불안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 나노입자가 이성분 나노유체의 대류 불안정성에 미치는 영향을 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 곡선 안쪽은 안정한 영역을, 바깥쪽은 불안정한 영역을 의미한다. 그래프로부터 ϕ 가 커질수록 안정한 영역이 넓어짐을 알 수 있는데, 이는 나노입자가 전반적인 영역에 걸쳐 계를 안정화 시킨다는 것을 의미한다. 그런데 음영을 넣은 영역을 고려해 보면, 나노입자가 첨가되지 않은 상태에서는 안정한 영역에 존재하다가 나노입자가 10% 첨가되면 불안정 영역으로 전이됨을 알 수 있다. 이는 물-알콜계 이성분 모유체의 ϕ 가 -0.3 임을 고려해 볼 때, 나노입자의 첨가로 Soret 효과를 가속화 하여 열 및 물질 전달의 향상을 일으킬 수 있음을 의미한다.

나노입자의 열확산 특성을 나타내는 δ_4 가 대류 불안정성에 미치는 영향을 Fig. 3에 도시하였다.

δ_4 가 양인 경우는 이성분 모유체의 용질이 기여하는 Soret 효과와 나노입자가 기여하는 Soret 효과가 서로 상승효과를 나타냄을 보여주고, 음인 경우에는 상쇄효과를 나타냄을 보여 주고 있다. δ_4 가 -1보다 큰 경우는 그 값이 클수록 계가 점점 불안정해지며, δ_4 가 -1 보다 작은 경우는 그 절대값이 클수록 계가 점점 안정해짐을 알 수 있다. 이로부터 나노입자의 선택 기준을 제시할 수 있다.

용질이 대류불안정성에 미치는 영향을 Fig. 4에 도시하였다. 초기 농도 $C_{s,i}$ 에 따라 곡선이 하향으로 움직이는 경향을 보이거나 그 폭은 매우 작음을 알 수 있다. 이는 이성분 모유체의 초기 농도가 대류 불안정성에 큰 영향을 주지 못함을 의미한다.

5. 결론

본 연구는 Soret 효과가 이성분 나노유체의 대류 불안정성에 미치는 영향을 선형 안정성 이론을 도입하여 해석한 것이다. 연구 결과 얻어진 결론은 다음과 같다

- (1) 이성분 모유체 자체가 갖고 있는 Soret 효

Table 1 Data for numerical calculation⁽²¹⁾

D (m ² /s)	β_T (K ⁻¹)	$C_{s,i}$ (kg/m ³)	ϕ	δ_1	δ_2	ψ
10^{-6}	0.001	100	0.1	8.96	0.83	-0.5

과(ϕ_b)가 계의 불안정성에 미치는 영향이 매우 크게 나타나며, 그 값이 클수록 계는 매우 불안정해 짐을 알 수 있다.

(2) 나노입자에 의해서 발생된 Soret 효과는 여러 조건들에 따라서 다양한 영향을 유발하였다. 특히 δ_4 가 -1인 점을 기준으로 서로 다른 불안정화 경향을 나타내었다.

(3) 이성분 모유체의 초기 농도는 Soret 효과에 의한 대류 불안정성에 거의 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

이상의 결론은 이론적 해석을 통해 얻은 것으로 실험을 통한 구체적인 검증이 요구된다. 그럼에도 본 연구에서는 이성분 유체의 특징인 Soret 효과를 처음으로 이론적으로 규명하였으며, 이는 이성분 나노유체에 대한 후행 연구에 도움이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 선도 연구자 지원(과제번호 KRF-2003-041-D00113)으로 수행되었으며 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.
- Das, S. K., Putra, N., Thiesen P. and Roetzel W., 2003, Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for nanofluids, J. of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567-574.
- 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.
- Xue, Y. Z., 2003, Model for effective thermal conductivity of nanofluids, Phys. Lett. A, Vol. 307, pp. 313-317.
- Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, Int. Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp. 58-64.
- 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.
- Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, Conceptions for heat transfer correlations of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3701-3707.
- Das, S. K., Putra, N. and Roetzel, W., 2003, Pool boiling of nano-fluids of horizontal narrow tubes, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 29, pp. 1237-1247.
- Vassallo, P., Kumar, R. and D'Amico, S., 2003, Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, pp. 407-411.
- Kim, J., Kang Y. T. and Choi, C. K., 2003, Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids, Phys. Fluids, Vol. 16, pp. 256-262.
- Jung, C. W., Kim, J., Kang, Y. T., and Choi, C. K., 2004, Analysis of the distributional stability in binary nanofluids, Proc. of the SAREK 2004 Summer Annual Conf., in here.
- Jung, J. Y., Kim, J. -K. and Kang, Y. T.,

- 2004, Study of ammonia absorption into binary nanofluids in bubble absorber, Proc. of the SAREK 2004 Summer Annual Conf., in here.
17. Kim, J., Kang, Y. T., and Choi, C. K., 2004, Analysis of convective instabilities of binary nanofluids, Proc. of the Int. Ref. Air Condition. Conf., Purdue, R062.
18. Hort, W., Linz, S. J., and Lucke, M., 1992, Onset of convection in binary gas mixtures: Role of the Dufour effect, *Phy. Rev. A*, Vol. 45, pp. 3737-3748.
19. Drazin, P. G. and Reid, W. H., 1981, *Hydrodynamic Stability*, Cambridge University Press, London, pp. 50-52.
20. Ryskin, A., Muller, H. W., and Pleiner, H., 2003, Thermal convection in binary fluid mixtures with a weak concentration diffusivity, but strong solutal buoyancy forces, *Phys. Rev. E*, Vol. 67, pp. 46302.
21. Çengel, Y. A., 1998, *Heat Transfer: A Practical Approach*, WCB/McGraw-Hill, New York, p. 423.