

수평원형관내 나노유체의 혼합대류에 관한 수치적 연구

최훈기^{1*}, 임윤승²

¹창원대학교 기계공학부 교수, ²창원대학교 기계공학부 대학원생

Numerical Study of Mixed Convection Nanofluid in Horizontal Tube

Hoon-Ki Choi^{1*}, Yun-Seung Lim²

¹Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University

²Student, Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University

요약 수평원형관에서 나노입자인 산화알루미늄과 기본유체인 물의 혼합인 나노유체에 대한 층류 혼합대류열전달현상을 유한체적법의 수치적 방법으로 규명하였다. 나노유체에 대하여 2상 혼합모델을 적용하였으며, 나노입자의 물성은 온도와 체적농도의 함수를 사용하였다. 수치해석에 적용한 모든 모델의 타당성 검증을 위하여 Kim등의 실험결과와 비교하였으며 좋은 결과를 얻었다. 벽면을 일정한 열유속으로 가열하므로 나노유체는 벽면부근에서 형성된 부력에 의하여 2차유동이 생성된다. Richardson수와 나노입자의 농도가 증가할수록 강한 2차유동이 형성되어 열전달을 향상시키게 된다. 또한 Richardson수와 나노입자의 농도가 증가하면 대류열전달계수와 전단응력도 증가한다. 이런 연구들은 열교환기의 성능향상을 위하여 나노유체를 적용하는데 기본자료로 활용이 가능하다. 이번 연구를 기반으로 향후 2중관형열교환기등 다양한 열교환기에 적용할 예정이다.

주제어 : 대류열전달계수, 나노유체, 혼합대류, 총전단응력, 체적분율

Abstract Laminar mixed convection of a nanofluid consists of water and Al_2O_3 in a horizontal circular tube has been studied numerically. Two-phase mixture model has been used to investigate hydrodynamic and thermal behaviors of the nanofluid with variables physical properties. Three dimensional Navier-Stokes, energy and volume fraction equations have been discretized using the finite volume method. The Brownian motions of nanoparticles have been considered to determine the thermal conductivity and dynamic viscosity of Al_2O_3 -Water nanofluid, which depend on temperature. The calculated results show good agreement with the previous numerical data. Results show that in a given Reynolds number (Re), increasing solid nanoparticles volume fraction and Richardson number (Ri) increases the convective heat transfer coefficient and wall shear stress.

Key Words : Convective heat transfer coefficient, Nanofluid, Mixed convection, Total shear stress, Volume fraction

*This paper was supported by the research fund of Changwon National University in 2019-2020.

*Corresponding Author : Hoon-Ki Choi(hkchoi@changwon.ac.kr)

Received July 1, 2019

Revised August 1, 2019

Accepted August 20, 2019

Published August 28, 2019

1. 서론

1.1 서론

크기가 작고 가볍고 성능이 우수한 열교환기에 대한 산업 수요는 매우 빠르게 증가하고 있다. 열교환기 성능을 증가시키는 방법으로는 열교환장치의 표면적 확대, 유체유동 속도 증가 및 유체의 물성치 변화등 다양한 방법이 있다. 이들 중 유체의 물성치 변화의 한 방법으로 기본유체에 미립의 고체 입자를 추가하여 고체-액체의 혼합물의 열전도도를 높이는 방법이 있다. 초기에는 혼합되는 금속산화물 입자들이 밀리미터 또는 마이크로미터의 입자에 한정되어졌다. 이런 단위의 입자들로 인하여 열교환장치에 많은 문제점들이 발생되었다. 마이크로 채널의 내부 유동인 경우 입자들이 채널 내부에 침전되어 열전달 성능을 현저히 떨어뜨리고, 영김이 발생되고 큰 압력강하가 나타나기도 하였다. 나아가 벽면과 입자들의 마찰로 인하여 배관의 벽면 침식이 발생되어 파손으로 이어지기도 하였다. 고체입자 크기를 나노단위의 미립자로 기계가공하는 기술이 개발됨으로 나노입자 소재기술등 융합적인 기술개발로 이러한 문제점을 해결할 수 있었다. 나노유체는 물과 같은 기본유체에 균일하고 안정적으로 부유하는 소량의 나노입자 (보통 100nm 미만)가 함유된 새로운 종류의 열전달 유체이다. 기본유체에서 소량의 고체 나노입자가 분산됨으로써 열전도도가 현저하게 증가한다. Choi [1]는 열전달을 향상시키고 열 장치의 크기, 무게 및 비용을 줄이며 압력강하에 큰 영향을 받지 않는 나노유체의 장점을 정량적으로 분석하였다. 금속 나노유체의 유효 열전도도는 평균입자 크기가 10nm이하인 Cu에 대하여 약 0.3% 체적분율을 함유하는 에틸렌글리콜로 구성된 나노유체의 경우 최대 40% 증가했음을 보였다. 많은 연구자들은 물 또는 에틸렌글리콜의 기본유체에 CuO 또는 Al₂O₃ 나노입자로 분산시킨 산화물 나노유체의 열전도도가 향상됨을 증명했다. Masuda등[2]은 체적분율이 4.3%이고 평균 직경이 13nm인 Al₂O₃ 입자를 사용한 나노유체의 열전도율이 30% 증가함을 보였다. 반면 Lee등[3]은 평균 입자직경이 큰 40nm인 경우에서의 열전도도는 10% 이하의 증가를 가져왔다. 나노유체가 기본유체보다 우수한 열전도도뿐만 아니라 대류 열전달 능력도 더 뛰어나다는 것을 보여주었다. Pak등[4]은 튜브 내부의 나노유체의 층류 및 난류 유동에 대한 대류 열전달에 대한 실험 결과를 얻었다. 그들은 물과 Cu, TiO₂ 및 Al₂O₃ 나노입자로 구성된 나노유체를 사용하여 Nusselt수에 대한 상관관계를 도출하였다. 동일한 Reynolds수에 대하여 기본유체보다 열

전달 성능이 현저히 향상되었음을 보여주었다. Xuan & Li[5]는 실험을 통하여 층류 및 난류에서의 나노유체에 대한 대류열전달계수 및 마찰계수를 구하였다. Reynolds와 입자 농도가 증가함에 따라 열전달계수도 증가함을 보였다. Moraveji등[6]은 물과 산화알루미늄이 혼합된 나노유체에 대하여 수치해석을 통하여 완전발달흐름 및 일정 열유속 조건에서 대류열전달계수를 구하였다. Reynolds수와 나노입자 농도가 증가함에 따라 열전달 계수가 증가함을 보였다. Maiga등[7]은 수치해석을 통하여 나노입자의 농도 및 Reynolds수를 변화시키며 열전달 특성을 구하였다. 농도 및 Reynolds수가 증가하면 대류 열전달계수가 증가함을 보였다. 최등[8]은 튜브내부 나노유체의 강제대류 열전달에서 수력학 및 열적 발달과정 현상에 대한 연구를 수행하였다. 열적 완전발달길이는 Reynolds수가 증가할수록 길어지고 나노유체의 농도가 증가할수록 짧아짐을 보였다.

원형 튜브에서 혼합대류는 열교환기 같은 엔지니어링 응용 분야에서 많이 적용되고 있다. 혼합대류 열전달에 대한 연구는 부력과 같은 특유한 특성이 튜브 전반의 유체 흐름의 유체 역학 및 열적 거동에 미치는 영향에 대한 정보를 제공한다. 부력은 수직 방향으로 작용하고 열전달을 증대시키는 튜브 내부의 2차유동을 생성한다[9-13].

에너지시스템에 대한 실험적[14] 또는 수치적기법[15]으로 많은 연구가 수행되어지고 있다. 본 연구에서는 원형 수평튜브에서 나노유체의 층류 혼합대류를 2상 혼합모형을 이용하여 수치적 해석을 수행하였다. 다양한 나노입자의 체적 분율에 대하여 발달과정 및 완전발달 유동의 열전달 및 수력학적 특성변화를 구하였다. 또한 Richardson수를 변화시키며 속도 및 온도분포를 비교 논의 하였고 튜브형 열교환기 설계에 적용할 수 있는 대류 열전달계수 및 전단력의 결과를 제시하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 형상정보 및 지배방정식

본 연구에서는 열유속이 일정한 수평원형관에서 기본유체인 물에 나노입자인 알루미늄(Al₂O₃)를 혼합한 나노유체의 혼합대류현상을 연구한다. Fig. 1은 전산해석에 사용된 형상을 도식화한 것이다.

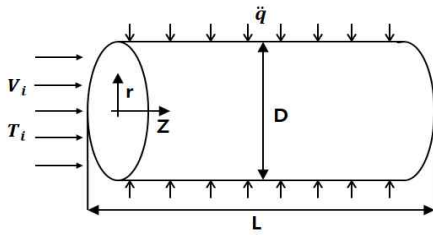


Fig. 1. Definition of numerical domain

해석에 사용된 튜브는 출구에서 수력학적, 열적인 완전발달조건을 충족시키기 위해 길이를 지름의 200배로 충분하게 주어 해석을 진행하였다. 나노유체는 정상상태, 비압축성이며, Reynolds수(Re)는 튜브 입구 나노유체를 기준으로 한 무차원수로 300으로 고정하였으므로 층류유동의 범위에서 해석이 수행되었다. 일반적인 나노유체의 입자크기(d_p)는 100nm이하의 크기로 하는데 본 연구에서는 $d_p=47\text{nm}$ 의 나노입자를 사용하였다. 나노유체는 액체-고체의 혼합이므로 특성을 모사하기 위해 Mixture model을 사용하였다. 나노유체의 유동현상을 구하기 위하여 다음과 같은 지배방정식이 사용되었다.

$$\text{연속방정식:} \\ \nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (1)$$

$$\text{운동량 방정식:} \\ \nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_m \nabla V_m) \\ + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right) \quad (2)$$

$$\text{에너지 방정식:} \\ \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k V_k \rho_k C_{pk} T) = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (3)$$

$$\text{체적분율 방정식:} \\ \nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (4)$$

여기서 하기첨자 m은 나노유체, p는 나노입자를 의미하며, V는 속도, ρ_m 는 나노유체 밀도, μ_m 는 점성계수를 나타낸다. V_m 은 질량평균속도로 아래 식과 같다.

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_k}{\rho_m} \quad (5)$$

식(2)에서 $V_{dr,k}$ 는 2차 위상 k^{th} 에 대한 드리프트 속도이다.

$$V_{dr,k} = V_k - V_m \quad (6)$$

상대 속도는 1차 위상의 속도에 대한 2차 위상의 속도로 정의된다.

$$V_{pf} = V_k - V_m \quad (7)$$

드리프트 속도는 상대속도와 연관이 있다.

$$V_{dr,p} = V_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{fk} \quad (8)$$

상대 속도는 Manninen등[16]이 제안한 식에 의해 결정되며 사용되는 f_{drag} 는 Schiller등[17]의 식에 의해 계산된다.

$$V_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} a \quad (9)$$

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687}, & Re_p \leq 1000 \\ 0.0183 Re_p, & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (10)$$

식(9)의 가속도(a)는 아래와 같다.

$$a = g - (V_m \cdot \nabla) V_m \quad (11)$$

2.2 나노유체의 물성치

나노입자가 추가된 나노유체는 기본유체보다 열전도도가 높다. 물과 나노입자가 섞인 나노유체의 물성치는 나노입자의 크기(d_p), 나노입자의 체적분율(ϕ), 온도(T) 등 여러 요인의 복잡한 함수관계로 나타난다. 이러한 이유로 나노유체의 물성치는 실험적인 값에 의존한다. 나노유체의 밀도와 비열은 혼합모델[18]을 사용하였다. 사용되는 하첨자 f는 기본유체를 의미하며 본 연구에서는 물이 사용됐다. 나노유체의 전산해석을 위해 다음과 같은 물성치를 사용하였다.

$$\rho_m = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (12)$$

$$(\rho c_p)_m = \phi(\rho c_p)_p + (1 - \phi)(\rho c_p)_f \quad (13)$$

여기서 ρ_m , c_{pm} 은 각각 나노유체의 밀도와 비열을 나타내며, 점성계수(μ_m)는 Vafai & Khanafer[19]이 제안한 모델식을 사용하였고, 열전도도(k_m)은 Vajjha & Das[20]가 제안한 모델식을 사용하였다. 점성계수와 열전도도식은 온도

와 농도의 함수로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \mu_m = & -0.4491 + \frac{28.837}{(T-273)} + 0.574\phi - 0.1634\phi^2 \\ & + 23.053 \frac{\phi^2}{(T-273)^2} + 0.0132\phi^3 \\ & - 2354.735 \frac{\phi}{(T-273)^3} + 23.498 \frac{\phi^2}{d_p^2} - 3.0185 \frac{\phi^3}{d_p^3} \end{aligned} \quad (14)$$

$$1\% \leq \phi \leq 9\%, \quad 293 \leq T(K) \leq 343, \quad 13nm \leq d_p \leq 131nm$$

$$\begin{aligned} k_m = & \frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\phi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\phi} k_f \\ & + 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f c_{pf} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi) \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} f(T, \phi) = & (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{273} \right) \\ & + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \end{aligned} \quad (15b)$$

$$\begin{aligned} \beta = & 8.4407(100\phi)^{-1.07304} \quad (15c) \\ 1\% \leq \phi \leq 10\%, \quad 298 \leq T(K) \leq 363, \quad 29nm \leq d_p \leq 77nm \end{aligned}$$

나노유체의 체적팽창계수(β_m)는 Khanfer등[21]이 제안한 모델식을 사용하였다.

$$\beta_m = \left[\frac{1}{1 + \frac{(1-\phi)\rho_f}{\phi\rho_p}} \frac{\beta_p}{\beta_f} + \frac{1}{1 + \frac{\phi}{1-\phi} \frac{\rho_p}{\rho_f}} \right] \beta_f \quad (16)$$

Al_2O_3 는 Mohammadpourard등[22]의 연구에 사용된 물성치를 사용하였으며 Table 1에 나타내었다. 기본유체인 물의 밀도(ρ_f), 점성계수(μ_f), 열전도도(k_f)는 온도의 영향을 고려하였으며 식(17)-(19)에 나타내었다. 비열(c_{pf})은 4200[kj/kg.K], 체적팽창계수(β_f)는 0.000214[1/K]로 일정한 값을 주었다.

$$\rho_f = -3.1 \times 10^{-3} T^2 + 1.5917 T + 801.92 \quad (17)$$

$$k_f = -0.5981 + 0.00653 T - 8.354 \times 10^{-6} T^2 \quad (18)$$

$$\mu_f = 0.1917 e^{-0.0181 T} \quad (19)$$

Table 1. Properties of Al_2O_3

Property	ρ_p [kg/m ³]	$c_{p,p}$ [J/kgK]	k_p [W/mK]	β_p [1/K]
Value	3900	785	36	0.000008

2.3 경계조건

지배방정식은 비선형 미분방정식으로 해를 구하기 위하여 적합한 경계조건을 필요로 한다. 본 연구에서는 입구에서 온도가 298K인 나노유체가 일정한 유속(V_i)으로 유입된다. 출구는 압력경계조건을 주어 대기압이 유지되도록 하였다. 튜브 내부 벽면은 no-slip 조건을 이용하였으며, 일정한 열유속(\ddot{q})이 벽면에서 유체로 공급되게 하였다.

2.4 무차원 변수 및 성능 분석식

3가지의 Richardson수(Ri), 5가지의 나노입자 체적분율(ϕ)을 변화시키며 혼합대류의 열전달 특성변화를 연구하기 위하여 본 연구에서는 층류영역인 Reynolds수(Re)를 300의 일정한 값으로 고정하였다. Reynolds수와 Richardson수의 정의는 다음과 같다.

$$Re = \frac{V_i D}{\nu_m} \quad (20)$$

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (21)$$

식(21)의 Gr은 Grashof수이며 열유속이 일정한 조건에서는 다음과 같이 정의된다.

$$Gr = \frac{g \beta_m \ddot{q} D^4}{\nu_m^2} \quad (22)$$

본 연구에서는 열전달 성능을 평가하기 위해 대류열전달 계수(h)는 식(23)과 같으며, 한 단면에서의 평균값이지만 튜브의 길이 방향으로 그 크기가 변화한다.

$$h(z) = \frac{\ddot{q}}{(T_w(z) - T_b(z))} \quad (23)$$

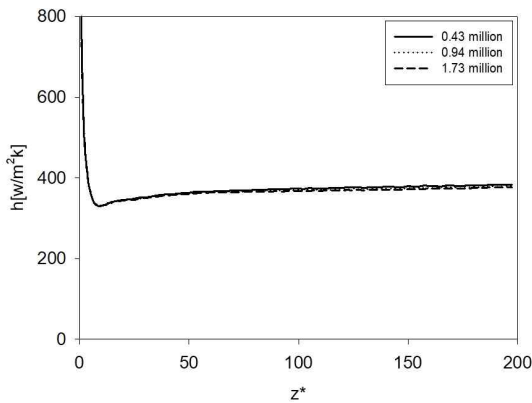


Fig. 2. Grid independence tests

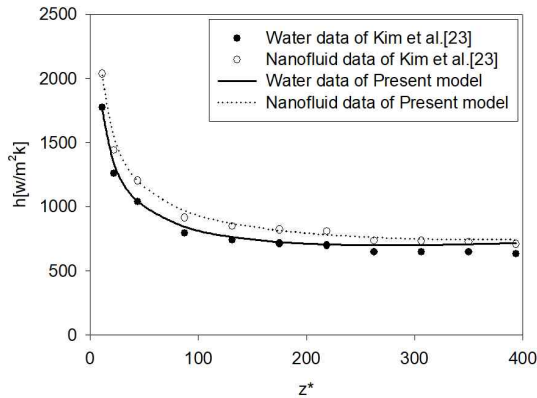


Fig. 3. Comparison of axial evolution of the convective heat transfer coefficient with the corresponding experimental data [21]

여기서 T_w 은 벽면의 평균온도, T_b 는 나노유체의 평균온도를 의미한다. 그리고 벽면의 마찰을 평가하기 위해 벽면의 총전단응력(τ_w)을 적용하였다.

2.5 수치해석 검증

본 연구에서는 상용프로그램인 ANSYS FLUENT [16]를 사용하였다. 해석 대상 영역은 Fig. 1과 같고, 수치해석을 위하여 격자수를 94만개로 적용하였다. 적용한 격자계의 타당성을 검증하기 위하여 43만개, 94만개 그리고 173만개의 격자계에서 대류열전달계수의 크기를 Fig. 2와 같이 나타내어 비교하였다. 본 연구에서 적용한 격자계들 사이에서 대류열전달계수의 크기가 크게 차이나지 않음을 볼 수 있듯이 적용한 격자수는 타당함을 보여주고 있다. 나노유체에 대한 수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Kim 등[23]이 수

행한 실험의 대류열전달계수와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 크기와 경향이 잘 일치하여 적용한 수치적 모델도 타당함을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 수치해석에 적용된 나노입자 크기를 $d_p = 47\text{nm}$ 로 일정하게 고정하고, 나노입자 체적분율(ϕ)과 Grashof 수의 영향(Richardson수로 표현)을 규명하기 위해 체적분율 $\phi = 0.0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07$ 의 5가지 및 $Ri = 0.5, 1.0, 2.0$ 의 3가지 조건하에서 해석을 수행하여 수력학적, 열적 특성을 규명하였다.

3.1 2차유동분포의 발달과정

입구에서 일정한 온도의 유체가 튜브로 유입되면 벽면으로부터 일정한 열을 받게 되므로 벽면근처에서부터 열 경계층이 형성되기 시작한다. 열 경계층 내부의 유체는 벽으로부터 열을 받아 온도가 상승하므로 밀도가 감소하여 벽면근처 경계층에서 부력이 형성된다. Grashof수의 크기에 의존하는 부력은 단면내의 벽면근처에서 상승유동, 단면 중심부에서는 하강유동의 2-셀 2차유동(2-cell secondary flow) 형성의 추진력으로 작용한다. 2차유동은 벽면근처의 고온유체에서 단면내부의 저온유체로 열전달이 잘되게 한다.

입구조건이 일정한 온도 및 속도를 주었으므로 입구에서부터 시작하여 출구로 유동이 진행됨에 따라 속도 및 온도 경계층이 발달되어 간다. Fig. 4는 축방향의 임의의 위치에서의 2차유동이 발달되어 가는 과정을 그림이다. 축방향의 무차원 길이(z^*)를 $z^*=z/D$ 로 나타낼 때, $z^*=5$ 이내에서는 속도 및 온도경계층의 형성이 시작되는 단계로 아직 부력에 의한 2차유동의 형성은 미약하고 단면중심으로 향하는 유동이 형성된다. $z^*=10$ 의 근처에서는 벽면부근의 유체는 온도가 높아져 부력에 의하여 상승하는 유동이, 단면중심부에서는 상대적으로 온도가 낮아 하강하는 2차유동이 형성됨을 볼 수 있다. $z^*=20$ 에서는 단면 내부와 벽면과의 온도차가 크기 때문에 부력에 의한 강한 2차유동이 형성된다. 후류로 진행됨에 따라 벽면과 단면내부 유체와의 온도차가 줄어들어 2차유동의 강도는 약하게 됨을 알 수 있다. 또한 2차유동 셀의 중심이 단면중심에서 벽면근처의 아래쪽으로 이동함을 볼 수 있다.

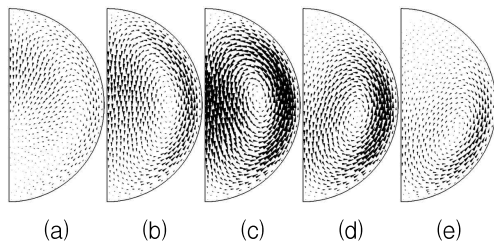


Fig. 4. Secondary flow for different axial positions at $\phi = 0.05$ and $Ri = 1$: (a) $z^* = 5$, (b) $z^* = 10$, (c) $z^* = 20$, (d) $z^* = 40$, (e) $z^* = 190$

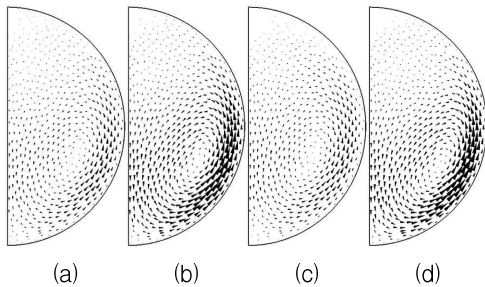


Fig. 5. Secondary flow for different flow conditions at $z^* = 190$: (a) $Ri = 1$, $\phi = 0.00$, (b) $Ri = 1$, $\phi = 0.07$, (c) $Ri = 0.5$, $\phi = 0.05$, (d) $Ri = 2$, $\phi = 0.05$

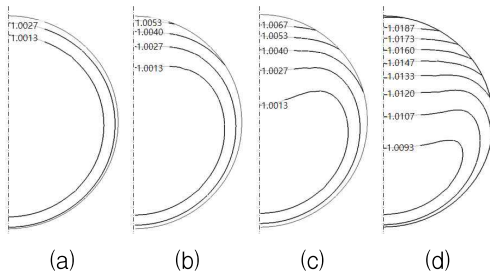


Fig. 6. Axial evolution of the Iso-temperature at $\phi = 0.05$ and $Ri = 1$: (a) $z^* = 10$, (b) $z^* = 20$, (c) $z^* = 40$, (d) $z^* = 190$

Fig. 5는 2차유동 형성에 나노입자의 체적분율과 Richardson수의 영향을 비교한 그림이다. Fig. 5(a)와 (b)는 Richardson수를 고정($Ri=1$)하고 나노입자 농도 ($\phi = 0.00, 0.07$)의 변화에 대하여 2차유동의 변화를 비교하였다. 체적분율이 클수록 나노유체의 열전도도가 증가하여 열전달이 잘 일어나게 되어 벽면근처 2차유동의 강도가 증가함을 볼 수 있다. Fig. 5(c)와 (d)는 입자농도($\phi = 0.05$)를 고정하고 Richardson수를 변화시키며 ($Ri=0.5, 2$)에 대하여 비교하였다. Richardson수가 증가하면 벽면근처의 부력

이 강하게 형성되어 2차유동의 강도도 증가함을 볼 수 있다.

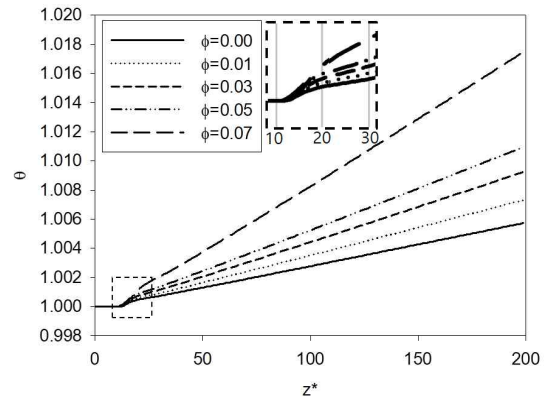


Fig. 7. Axial variation of the center-point temperature for different ϕ at $Ri = 1$.

3.2 온도의 발달과정

입구에서 일정한 온도의 유체가 튜브로 유입되면 벽면으로부터 일정한 열유속을 받게 되어 벽면근처에서부터 열경계층이 형성되기 시작한다. 점진적으로 열경계층이 증가하여 임의의 길이에서 열적인 완전발달을 하게 된다. Fig. 6은 단면에서 축방향의 임의지점 단면에서 입구온도(T_i)로 무차원시킨 온도($\theta = T/T_i$)에 대한 등온선 분포를 나타낸 그림이다. 부력의 영향이 약한 $z^* = 10$ 지점에서는 벽면 근처에서는 대부분 전도에 의하여 온도경계층이 형성되기 시작하고 상·하 거의 대칭적인 분포를 한다. 유동이 후류로 흐름에 따라 부력의 영향이 점점 증가하며 상부로부터 하강하는 고온의 2차유동에 의하여 단면중심의 상부가 하부보다 온도가 상승하게 된다. 2차유동에 의하여 벽면의 열이 단면중심으로 전달되어 온도가 점점 상승하고 단면의 상부와 하부의 온도는 점점 비대칭적인 분포를 하게 되며 최저온도지점도 단면중심에서 단면하부로 이동하게 된다.

온도상승에 대한 나노입자 체적분율의 영향을 평가하기 위하여 단면의 중심점에서 축방향의 무차원 온도 크기를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 입구에서 $z^* = 12$ 까지는 부력의 영향이 없고 전도에 의하여 열경계층이 형성되므로 중심점에서의 온도는 입구온도와 동일한 값을 유지함을 볼 수 있다. 축방향 위치 $12 < z^* < 20$ 에서는 중심점에서의 온도가 선형적으로 증가하는데 이 구간에서는 전도뿐만 아니라 혼합대류의 2차유동에 의한 열전달이 조금씩 활성화되는 구간으로 볼 수 있고 나노입자의 체적분율 영향도 조금씩 나타나게 된다. $z^* > 20$ 에서는 농도의 영향이 커지나 온도의 상승기울기

는 약간 감소함을 볼 수 있다. 이는 2차유동이 활발해져 온도의 최저점이 중심에 위치하는 것이 아니라 단면하부로 이동되기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 또한 나노입자 체적분율이 증가하면 온도의 상승 기울기는 더 커져 중심점의 온도상승도 빨라짐을 볼 수 있다.

3.3 대류열전달계수

Fig. 8은 나노유체에서 대류열전달계수의 축방향으로 발달과정을 나타낸 그림이다. 우선 동일한 나노입자의 체적분율($\phi = 0.03$)에 대하여 부력이 없는 강제대류와 부력이 있는 혼합대류간의 대류열전달계수를 비교하였다. 부력이 없는 강제대류에서는 열유속이 일정한 벽면 경계조건에서 튜브입구에서 무한대의 크기인 대류열전달계수가 점진적으로 작아지다가 온도경계층이 발달하면 일정한 값으로 유지한다. 하지만 혼합대류인 경우는 온도경계층의 발달과정에서 2차유동이 형성되어 온도구배가 강제대류보다는 더 크므로 대류열전달계수도 강제대류열전달 보다 더 큰 값을 가지게 된다. 한편, 나노입자 체적분율이 $\phi = 0.03$ 인 강제대류의 대류열전달계수보다 오히려 $\phi = 0.00$ 인 기본유체의 혼합대류의 대류열전달계수가 더 크다. 이는 부력의 영향이 열전달향상에 더 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

다음은 부력이 존재하는 혼합대류에서 나노입자 체적분율의 변화에 대한 대류열전달계수의 변화를 Fig. 8에서 비교하였다. 부력의 영향이 미약하고 온도경계층이 형성되는 튜브입구근처에서는 벽면근처 유체의 온도구배가 아주 크므로 대류열전달계수가 매우 큰 값을 가지게 된다. 후류에서는 온도경계층이 발달되므로 벽면에서의 열유속이 일정한 조건에서의 벽면근처 온도구배는 일정한 값을 가지게 되고 대류열전달계수도 일정하게 유지된다. 나노입자 체적분율이 클수록 나노유체의 열전도도는 높아져 분자의 열확산이 증가하게 되므로 유체의 평균온도와 벽면의 온도차이가 작아지게 된다. 이는 벽면의 열유속 조건을 일정하게 하였으므로 대류열전달계수의 크기는 증가하게 된다.

혼합대류열전달은 Reynolds수(Re)와 Grashof수(Gr)가 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 $Re=300$ 으로 일정하게 하였으므로 Richardson수(Ri)의 변화는 Grashof수의 변화와 같은 역할을 한다. Fig. 9는 $z^*=190$ 에서 Richardson수와 체적분율을 변화시키며 기본유체($\phi=0.00$)에 대한 나노유체의 대류열전달계수 증가비율을 나타낸 그림이다. 동일한 나노입자 체적분율에 대하여 Richardson수가 증가하면 기본유체의 대류열전달계수도 증가하지만 나노유체의 대류열전

달계수의 증가비율이 커짐을 알 수 있다. 체적분율이 작은 $\phi = 0.01$ 에서는 차이는 미미했지만 $\phi = 0.03$, $\phi = 0.05$ 에서는 $Ri=0.5$ 보다는 $Ri=1$ 또는 $Ri=2$ 에서의 대류열전달계수 증가비율이 커짐을 볼 수 있다. 동일한 Richardson수에 대하여 나노입자 체적분율이 증가할수록 대류열전달계수가 훨씬 증가함을 볼 수 있으며, $Ri=2$, $\phi=0.07$ 에서 기본유체 대비 대류열전달계수는 최대 44%의 증가율을 보이고 있다.

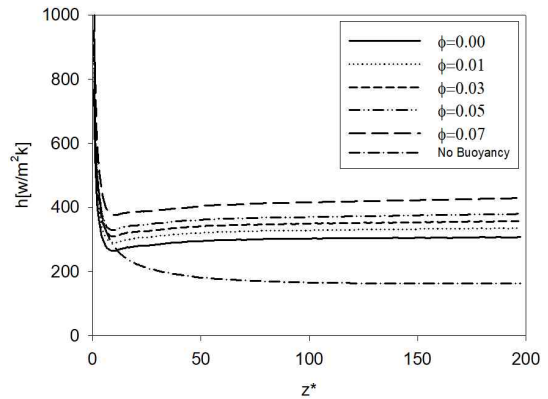


Fig. 8. Axial development of the convective heat transfer coefficient for different ϕ at $Re = 300$ and $Ri = 1$.

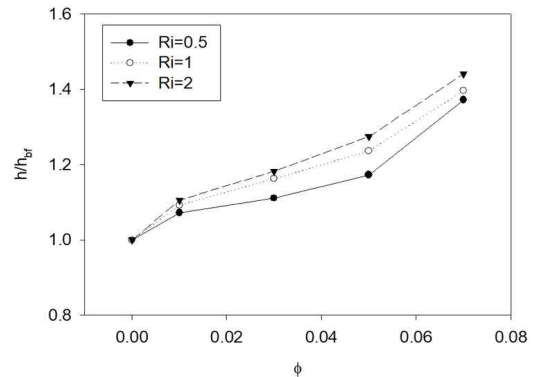


Fig. 9. Convective heat transfer coefficient for different Ri and ϕ at $Re=300$ and $z^*=190$

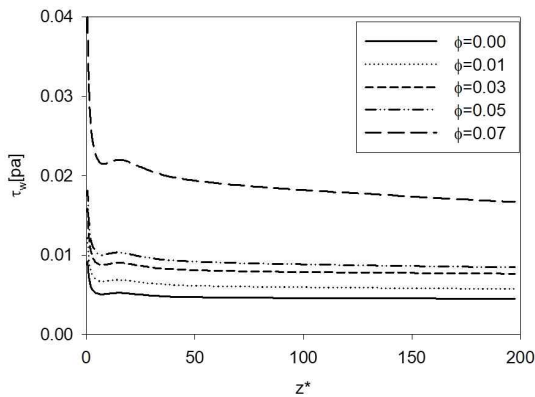


Fig. 10. Axial development of the total wall shear stress for different ϕ at $Re=300$ and $Ri=1$

3.4 벽면전단응력에 대한 결과

벽면과 유체와의 마찰로 인한 전단응력은 튜브 유동에서 압력강하를 일으키는 주요 원인이 되므로 중요한 물리량이 된다. Fig. 10은 축방향의 임의의 단면에서 벽면 총전단응력 (τ_w)을 나노입자 체적분율 변화에 대해 나타낸 그림이다. 총전단응력은 반경방향, 원주방향 그리고 축방향 전단응력의 제곱평균을 취한 값이다. 튜브입구에서 무한대의 크기인 총전단응력은 점진적으로 작아지다가 속도경계층이 완전 발달하면 일정한 값으로 유지한다. 하지만 혼합대류인 경우 속도 경계층의 발달과정에서 주 속도에 의한 전단응력 뿐만 아니라 2차유동에 의한 전단응력도 고려되어야 하므로 강제대류 보다는 전단력이 증가하게 된다. 또한 체적분율이 증가함에 나노유체의 점성계수가 커지게 되고 이로 인하여 총 전단응력도 증가됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 열유속이 일정한 수평원형관에서 나노유체의 혼합대류 열전달의 유동 및 열적 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Richardson수와 나노입자의 체적분율이 클수록 2차 유동의 강도는 증가한다.
- (2) 나노유체의 온도분포는 부력에 의한 2차유동으로 열전달이 상승하며 온도 최저점이 중심부의 하단에 위치한다.
- (3) Richardson수와 나노입자의 체적분율이 증가할수록 열전달이 잘 일어나 대류열전달계수도 증가한다. 완전

발달 유동($z^*=190$)에서 기본유체 대비 $\phi = 0.07$ 인 경우의 대류열전달계수는 44%($Ri=2$ 경우) 증가하였다.

- (4) 나노입자의 체적분율이 증가할수록 점성계수는 감소하지만 속도구배의 증가로 인하여 총 전단응력도 증가한다.

REFERENCES

- [1] S. U. S. Choi. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles. *Developments and Applications of Non-Newtonian Flow, ASME, FED 231/MD, 66*, 99-105.
- [2] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae & N. Hishinuma. (1993). Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersions Of $-Al_2O_3$, SiO_2 , and TiO_2 Ultra-Fine Particles). *Netsu Bussei (Japan)*, 4, 227-233.
- [3] S. Lee, S. U. S. Choi, S. S. Li & J. A. Eastman, (1999). Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles. *J. Heat Transfer*, 121, 280-289.
- [4] B. C. Pak & Y. I. Cho. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Transfer*, 11, 151-170.
- [5] Y. M. Xuan & Q. Li. (2003). Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 125, 151-155.
- [6] M. K. Moraveji, M. Darabi, S. M. Hossein Haddad & R. Davarnejad. (2011). Modeling of Convective Heat Transfer of a Nanofluid in the Developing Region of Tube Flow with Computational Fluid Dynamics. *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 38, 1291-1295.
- [7] S. E. B. Maiga, S. J. Palm, C. T. Nguyen, G. Roy & N. Galanis. (2005). Heat Transfer Enhancement by Using Nanofluids in Forced Convection Flows. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 26(4), 530-546.
- [8] H. K. Choi & G. J. Yoo. (2014). Numerical study on nanofluids forced convection in circular tubes. *J. Comput. Fluids Eng*, 19, 37-43
- [9] Y. Mori, K. Futagami, S. Tokuda & M. Nakamura. (1966). Forced convective heat transfer in uniformly heated horizontal tubes, 1st report, Experimental study on the effect of buoyancy. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 9, 453-463.
- [10] K. C. Cheng & F. P. Yuen. (1985). Flow visualization studies on secondary flow pattern for mixed convection in the thermal entrance region of

- isothermally heated inclined pipes. *ASME Heat Transfer Division*, 42, 121-130.
- [11] G. S. Barozzi, E. Zanchini & M. Mariotti. (1998). Experimental investigation of combined forced and free convection in horizontal and inclined tubes. *Meccanica*, 20, 18-27.
- [12] C. Zhang. (1992). Mixed convection inside horizontal tubes with nominally uniform heat flux. *AIChE Symp.* 88, 212-219.
- [13] G. J. Hwang & H. C. Lai. (1994). Laminar convection heat transfer in a horizontal isothermal tube for high numbers. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 37, 1631-1640.
- [14] K. J. Kim. (2018). A Study on the Effect of Graphene Substrate for Growth of Vanadium Dioxide Nanostructures. *Journal of Convergence for Information Technology*, 8, 95-100.
- [15] Y. S. Jeong, Y. T Kim & G. C Park. (2016). A Three-dimensional Numerical Weather Model using Power Output Predict of Distributed Power Source. *Journal of Convergence for Information Technology*, 6, 93-98.
- [16] M. Manninen, V. Taivassalo & S. Kallio. (1996). On the mixture model for multiphase flow. *VTT Publications*, 288, Technical Research Centre of Finland.
- [17] L. Schiller & Z. Naumann. (1935). A drag coefficient correlation, *V.D.I. Zeitung* 77, 318.
- [18] 2019, Fluent, ANSYS Fluent V.19 User Guide, USA.
- [19] K. Khanafer & K. Vafai. (2011). A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4010-4428.
- [20] R. S. Vajjha & D. K. Das. (2009). Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 4675-4682.
- [21] K. Khanafer, K. Vafai & M. Lightstone. (2003). Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46, 3639-3653.
- [22] S. A. Zonouzi, H. Aminfar & M. Mohammadpourfard. (2014). 3D Numerical Investigation of Thermal Characteristics of Nanofluid Flow through Helical Tubes Using Two-Phase Mixture Model. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 15, 512-521.
- [23] D. H Kim et al. (2009). Convective heat transfer

characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. *Current Applied Physics*, 9, 119-123.

최훈기(Hoon-Ki Choi)

[정회원]



- 1985년 2월 : 부산대학교 기계설계공학과(공학사)
- 1988년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)
- 1993년 2월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 열전달, 에너지시스템, 배기가스 저감
- E-Mail : hkchoi@changwon.ac.kr

임윤승(Yun-Seung Lim)

[학생회원]



- 2018년 2월 : 창원대학교 기계공학부(공학사)
- 2018년 2월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부(공학석사과정)
- 관심분야 : 에너지시스템, 전산유체역학
- E-Mail : lys9348@naver.com