

이중관 내부 나노유체의 유동방향 영향에 관한 연구

최훈기*,#, 임윤승*

*국립창원대학교 기계공학부

A Study on the Effect of Nanofluids Flow Direction in Double Pipe

Hoon-Ki Choi*#, Yun-Seung Lim*

*School of Mechanical Engineering, Changwon National University

(Received 09 March 2021; received in revised form 01 April 2021; accepted 20 April 2021)

ABSTRACT

We compared the heat transfer characteristics of the parallel and the counterflow flow in the concentric double tube of the Al_2O_3 /water nanofluids using numerical methods. The high- and low-temperature fluids flow through the inner circular tube and the annular tube, respectively. The heat transfer characteristics according to the flow direction were compared by changing the volume flow rate and the volume concentration of the nanoparticles. The results showed that the heat transfer rate and overall heat transfer coefficient improved compared to those of basic fluid with increasing the volume and flow rate of nanoparticles. When the inflow rate was small, the heat transfer performance of the counterflow was about 22% better than the parallel flow. As the inflow rate was increased, the parallel flow and the counterflow had similar heat transfer rates. In addition, the effectiveness of the counterflow increased from 10% to 22% rather than the parallel flow. However, we verified that the increment in the friction factor of the counterflow is not large compared to the increment in the heat transfer rate.

Key Words : Al_2O_3 /water Nanofluid(알루미나 나노유체), Counter Flow(대향유동), Parallel Flow(평형유동), Volume Concentration(체적 분율), Overall Heat Transfer Coefficient(총괄 열전달 계수), Heat Transfer Rate(열전달율)

1. 서 론

산업계에서 사용하고 있는 열교환기의 열전달 성능향상은 매우 중요하다. 대개 열교환기의 표면적 확대, 유속증가 그리고 유체의 물성치 변화로 열교

환기 성능을 향상시키고 있다. 이들 중 유체의 물성치 변화의 한 방법으로 열전도도가 낮은 물 또는 오일등의 기본유체에 열전도도가 아주 큰 나노단위의 고체 입자를 분산시켜 열전도도를 높이는 방법이 있다. 1873년 맥스웰^[1]의 연구는 기본유체에 마이크로미터 크기의 고체입자를 분산시켜 고체입자 체적농도를 증가시킴으로써 혼합물의 열전도도를 증가시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 그 후 마이 크로미터의 입자보다 더 미세한 나노미터 크기(일

Corresponding Author :hkchoi@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3628, Fax: +82-55-263-5221

반적으로 100nm 미만)의 입자를 만드는 기술이 향상되었고 나노입자를 물과 같은 기본유체에 균일하게 분산시킨 나노유체라고 불리는 새로운 종류의 고체-액체 혼합물을 만들었다^[2]. 즉, 물이나 EG와 같은 열전도도가 낮은 유체에 소량의 고체 나노입자를 분산시키면 열전도도가 증가하게 된다^[3-5].

나노 유체의 대류열전달계수 및 총합 열전달 계수에 대하여 발표된 연구의 대부분은 기본 유체의 열전달계수와 비교하여 나노유체의 열전달계수가 향상되었음을 보여주었다. Mirmasoumi 등^[6]은 원형관내 층류유동인 경우 혼합대류 조건에서 나노입자 평균 직경의 크기변화에 따른 열전달 특성변화를 연구했다. 나노입자의 직경이 작아짐에 따라 대류 열전달성능이 크게 증가함을 보여주었다. Maiga 등^[7]은 나노입자의 체적농도 및 유속을 변화시키며 열전달 특성을 수치해석을 통하여 구하였다. 농도 및 유속이 커지면 대류 열전달계수가 증가함을 보였다. Choi 등^[8]은 원형관 내부 나노유체의 강제대류 열전달에서 수력학적, 열적의 완전발달길이 및 열전달계수의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 수력학적 및 열적 완전발달길이는 유속이 증가할수록 길어지고 열전달계수도 증가함을 보였고, 열적 발달길이는 나노유체의 체적농도가 증가할수록 짧아짐을 보였다. 아울러 입자의 농도가 클수록 열전달 계수가 증가함을 보였다. Choi 등^[9]은 원형관에서 혼합대류 열전달특성을 수치방법을 통하여 구하였다. Richardson수의 크기와 나노입자의 체적분율에 대한 대류열전달계수를 구하였다. 체적분율이 증가할수록 대류열전달계수도 증가함을 보였다. Farajollahi 등^[10]은 헬 및 튜브 열교환기에서 Al₂O₃와 물의 나노유체 열전달 특성에 대한 실험적 연구를 수행했다. 그들은 일정한 Peclet 수에서 나노입자 체적분율이 증가함에 따라 총합 열전달계수가 증가한다는 것을 관찰했다. Pak과 Cho^[11]는 Al₂O₃과 물의 나노 유체를 사용하여 열전달특성을 연구했다. 그들은 나노 입자 체적분율과 레이놀즈수가 증가하면 나노유체의 Nusselt수가 증가한다고 보고하였다.

이중관형 열교환기는 열이 분리된 원통형 벽을 통해 뜨거운 유체에서 차가운 유체로 전달되는 열교환기로 제조하기 간단하고 소형으로 제작이 가능하여 산업 응용 분야에서 많이 사용되는 열 교환기

이다. 원형관과 그를 둘러싸고 있는 환형관으로 구성되며 상대적으로 작은 직경으로 인해 유체가 고압의 조건과 고온용도로 적합하다. 또한, 섹션당 열전달량이 적으므로 큰 열전달 표면이 필요하지 않은 응용 분야에서 많이 사용되는 열교환기이다. 이중관형 열교환기의 내부에 나노유체가 흐르는 경우에 대한 열전달 메커니즘에 대한 연구가 최근에 이루어지고 있다. El-Maghlany 등^[12]은 Cu-물 나노유체를 사용한 이중관형 열교환기의 유용도 및 NTU를 관찰했다. Darzi 등^[13]은 작동 유체의 다른 온도 범위에서 이중관형 열교환기에서 Al₂O₃-물 나노유체의 열전달 및 압력강하를 추정했다. Hemmat Esfe 등^[14]은 입자의 다양한 체적분율의 조건에서 이중관형 열교환기에서 MgO-물 나노유체의 대류 열전달 계수를 구하였다. Aghayari 등^[15]은 대향유동의 이중관형 열교환기에서 Al₂O₃-물 나노유체의 체적농도가 0.3%에 대해 열전달계수가 19%, Nusselt수가 24% 증가함을 관찰했다. Sudarmadji 등^[16]은 Al₂O₃-물의 나노유체에서 고온유체가 원형관 내부로, 저온유체가 환형관으로 흐르는 조건에서 체적농도 0.5%에서 Nusselt 수가 40.5% 증가함을 보였다. 최근에 Lim 등^[17]은 나노입자의 체적농도와 유입유량 변화에 따른 총합열전달계수와 마찰인자의 변화를 구하였다. 체적농도 및 유량이 증가할수록 총합열전달계수와 마찰인자의 크기도 증가함을 보였다.

열교환기에서 고온유체와 저온유체와의 유동형태(방향)는 일반적으로 3종류로 나눈다. 고온유체와 저온유체가 동일한 유동을 하는 평행유동, 서로 반대방향으로 흐르는 대향유동 그리고 서로 수직으로 흐르는 직교유동으로 나눌 수 있다. 이중관형 열교환기에서는 직교유동을 구성하기 어려우므로 평행유동 및 대향유동으로 구성할 수 있다. 모든 조건이 동일하고 유동의 방향만 바뀌어도 평균온도차, 대류열전달계수 및 총합열전달계수의 크기가 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이중관형 열교환기내부에 안정화 된 Al₂O₃-물 나노유체에 대하여 평균온도차, 총합 열전달계수, 유용도, 압력강하 특성이 평행유동과 대향유동의 유동방향에 따라 다르게 나타남을 수치적 방법으로 비교하려 한다. 수치해석은 나노유체의 상이한 체적농도 및 다양한 나노유체 유량조건에서 수행되었다.

2. 수치해석 방법

2.1 형상정보 및 지배방정식

전산해석에 사용된 이중관의 해석영역을 Fig. 1에 나타내었다. 원형관과 환형관의 내경이 각각 r_i 및 R 이고 길이가 L 인 이중관 내부에 기본유체인 물에 산화알루미늄(Al_2O_3)을 분산시킨 나노유체를 유입시킨다. 환형관에 저온유체를, 원형관에 고온유체가 서로 평행유동 및 대향유동으로 흐르게 구성한다. 대개 나노유체의 입자크기(d_p)는 100nm이하로 제한하고 있으며 본 연구에서는 입자크기(d_p)를 47nm로 설정하였다. 나노유체는 액체-고체의 혼합이므로 본 연구에 사용된 입자거동은 상간의 침투와 상간의 속도차를 허용한 Euler-Mixture 모델^[19]을 사용하였다. 나노유체 제조 시 초음파처리, 계면활성제의 첨가등 다양한 화학적인 방법을 사용하면 응집현상을 획기적으로 감소시키는 접근법이 개발되어 좋은 결과를 얻고 있으므로 응집과 침강현상은 고려하지 않았다. 나노유체의 유동 및 열전달 현상을 구하기 위하여 아래와 같은 지배방정식들이 사용되었다.

연속방정식:

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식:

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

에너지 방정식:

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k V_k \rho_k c_{pk} T) = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (3)$$

체적분율 방정식:

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

여기서 기술된 k , c_p , ρ 및 μ 는 열전도도, 비열, 밀도 및 점성계수를 나타내며, 하첨자 f는 기본유체, m은 나노유체, p는 나노입자를 의미한다. V_m 은 질량평균속도, $V_{dr,p}$ 는 드리프트 속도를 나타낸다.

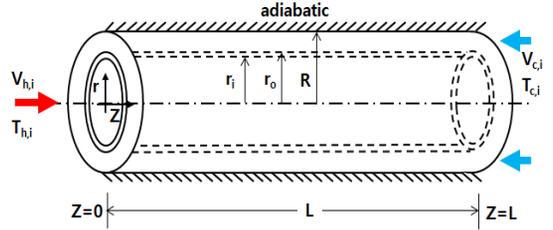


Fig. 1 Definition of numerical domain

2.2 나노유체의 물성치

물과 나노입자의 혼합물인 나노유체의 밀도, 점성계수, 열전도도등은 나노입자 직경(d_p), 체적농도(ϕ), 온도(T) 등 여러 인자들과 실험적 결과를 바탕으로 한 복잡한 상관관계식으로 표현된다. 나노유체의 밀도(ρ_m)와 비열(c_{pm})은 혼합모델^[19]을 사용하였으며 나노유체의 전산해석을 위해 다음과 같은 상관식을 사용하였다.

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

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

나노유체의 점성계수(μ_m)와 열전도도(k_m)은 온도와 농도에 민감하므로 이들의 함수로 나타내었다. 점성계수는 Vafai & Khanafer^[18]이 제안한 상관관계식을 사용하였고, 열전도도는 Vajjha & Das^[20]가 제안한 상관관계식을 사용하였다.

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

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

Table 1 Properties of Al_2O_3

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

Table 2 Properties of NanoFluid at 25°C

ϕ	ρ_m [kg/m ³]	μ_m [kg/m.s]	k_m [W/mK]
0	1000.916	0.000869	0.60620
0.02	1058.897	0.001151	0.67079
0.05	1145.870	0.001309	0.72473
0.08	1232.842	0.002752	0.78304

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

수식(15a)의 앞부분은 정적거동을 나타내며 뒷부분은 Brownian 거동을 고려한 열전도도를 나타낸 식이다.

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

$$\beta = 8.4407(100\phi)^{-1.07304} \quad (15c)$$

$$1\% \leq \phi \leq 10\%, \quad 298 \leq T(K) \leq 363, \quad 29nm \leq d_p \leq 77nm$$

Table 1에 Mohammadpourdard등^[21]의 연구에 사용된 고체입자인 Al₂O₃의 물성치를 나타내었다.

식(16)-(18)는 기본유체인 물의 열전도도(k_f), 밀도(ρ_f) 및 점성계수(μ_f)는 일정한 값으로 설정할 수 있으나 정확도를 위하여 온도의 함수로 나타낸 식이다. 비열($c_{p,f}$)은 일정한 값인 4200[kJ/kg.K]로 주었다.

$$\rho_f = -3.1 \times 10^{-3} T^2 + 1.5917T + 801.92 \quad (16)$$

$$k_f = -0.5981 + 0.00653T - 8.354 \times 10^{-6} T^2 \quad (17)$$

$$\mu_f = 0.1917e^{-0.0181T} \quad (18)$$

관계식(16)-(18)을 이용하여 상온상태(25°C)에서

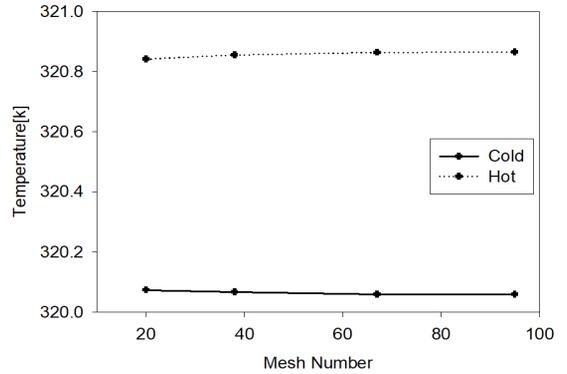


Fig. 2 Grid independence tests(Temperature at each outlet)

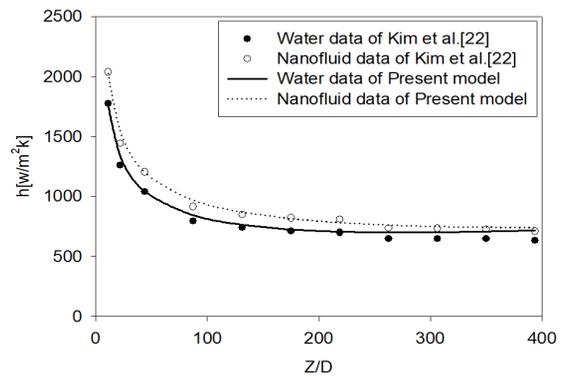


Fig. 3 Comparison of axial evolution of the convective heat transfer coefficient with the corresponding experimental data ^[22]

나노입자 체적농도별 물성치를 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 체적농도는 5%이하를 주로 사용하지만 열전달경향을 파악하고자 8%까지 적용하였다. 열전도도 및 밀도는 체적농도에 선형적으로 증가하지만 점성계수는 $\phi = 0.08$ 에서 급격히 상승한다.

2.3 경계조건

지배방정식의 속도 및 온도에 대한 해를 구하기 위하여 적합한 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 고온유체가 흐르는 원형관 입구온도($T_{h,i}$)가 343K, 저온유체가 흐르는 환형관 유체의 입구($T_{c,i}$)를 298K인 나노유체가 주어진 크기의 체적유량으

로 유입된다. 관들의 출구는 대기압력 경계조건을 주었으며, 관 내부 벽면은 no-slip 조건을 적용하였고 환형 관 외벽은 단열조건을 주었다. 입구에서는 유량의 크기를 변화시키며 해석을 수행하였는데 이 경우의 상용 Reynolds수는 500-2000의 크기 범위로 층류유동 영역이므로 난류모델이 필요하지 않았다.

2.4 수치해석 검증

본 연구에서는 정확도가 검증된 상용프로그램인 ANSYS FLUENT^[19]를 사용하였다. 적용한 격자계의 타당성을 검증하기 위하여 격자수가 20만개, 38만개, 67만개, 95만개에 대하여 출구온도 최대값으로 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 격자수 67만개 이상에서 출구 온도의 크기가 차이나지 않음을 볼 수 있듯이 본 연구에 적용한 67만개의 격자수는 타당함이 입증된다. 본 연구에 적용된 나노유체에 대한 수치해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 Kim 등^[22]의 실험결과와 본 연구 수치해석의 대류열전달계수를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 대류열전달계수가 최대 7%, 평균 3%이내의 오차로 크기와 경향이 잘 일치하여 적용한 수치적 방법이 타당함을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Al₂O₃-물의 나노유체를 이중관에 유입시키고 유동의 방향을 대향유동 및 평행유동으로 각각 구성하여 열전달성능을 비교하였다. 열전달 및 유동특성은 대수평균온도차(ΔT_{LM}), 열전달율(Q), 총합열전달 계수(U), 유용도(ϵ) 및 마찰인자(f)로 나타내었다. 열전달 성능비교 시 입구유량의 영향뿐만 아니라 나노입자의 체적농도(ϕ)의 영향도 파악하였다.

3.1 대수평균온도차

고온유체와 저온유체간의 평균온도차는 열교환기 해석에서 가장 중요한 물리량이다. 환산하기 쉬운 산술평균온차로 구하면 열교환기의 각 지점에 따라 달라지므로 온도차의 오차가 발생된다. 이를 보완하기 위하여 대수평균온도차(ΔT_{LM})를 많이 사용하

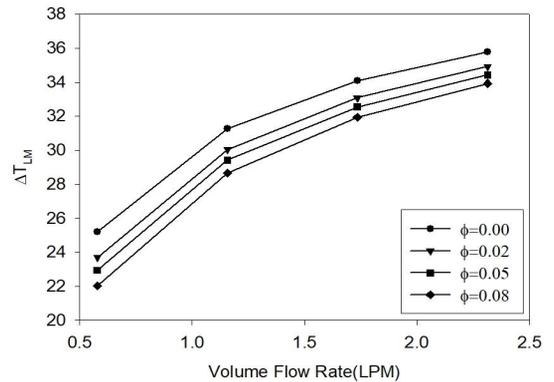
며 유동방향에 따라 식(19)과 같이 구분된다.

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (19)$$

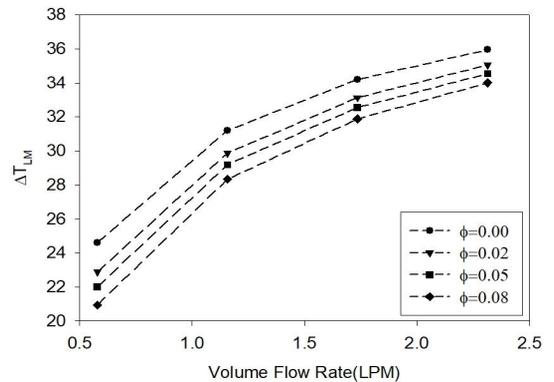
평행유동 및 대향유동에 대한 평균온도차 (ΔT)는 다음 식(20)과 같이 정의된다.

$$\Delta T_1 = \begin{cases} T_{h,i} - T_{c,i}, & \text{평행유동} \\ T_{h,i} - T_{c,o}, & \text{대향유동} \end{cases} \quad (20.1)$$

$$\Delta T_2 = \begin{cases} T_{h,o} - T_{c,o}, & \text{평행유동} \\ T_{h,o} - T_{c,i}, & \text{대향유동} \end{cases} \quad (20.2)$$



(a) Counter flow



(b) Parallel flow

Fig. 4 Mean temperature difference versus volume flow rates for various concentrations

여기서 T 는 온도를 나타내며, 하첨자 c 및 h 는 저온유체 및 고온유체를 i 및 o 는 입구 및 출구를 의미한다.

Fig. 4는 대향유동 및 평행유동에 대한 대수평균 온도차를 나타낸 그림이다. 유입유량이 증가하면 관 내부의 유속이 증가하여 속도 및 열적 경계층이 얇아지므로 고온유체와 저온유체간사이의 평균온도차는 점점 커지게 된다. 하지만 동일한 유입유량에 대하여 나노입자의 농도를 증가시키면 고온유체와 저온유체간의 열전달이 잘 일어나 평균온도차가 줄어들게 됨을 알 수 있다. 유입유량이 적은 경우에는 평행유동보다 대향유동의 대수평균온도차가 큰 값을 가지지만 유량이 증가할수록 평행유동과 대향유동의 대수평균온도차가 비슷해짐을 알 수 있다.

3.2 총합열전달계수

총합열전달계수(U)는 저온유체 대류열전달계수(h_c)와 고온유체 대류열전달계수(h_h) 및 관벽의 열저항으로 나타낼 수 있다. 원형관벽에서의 열전도는 매우 큰 값이므로 관벽에서의 전도열저항을 무시하면 총합열전달계수를 식(21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{1}{1/h_h + 1/h_c} \quad (21)$$

여기서, U 는 총합열전달계수, h 는 평균대류열전달계수, c, h 는 저온유체, 고온유체를 의미한다.

식(21)에서와 같이 총합열전달계수는 고온유체와 저온유체의 대류열저항의 합이므로 대류열전달계수와 비슷한 경향을 한다. Lim등^[17]의 논문에서 기술한 바와 같이 유입유량이 증가하면 온도 및 속도 경계층이 얇아지므로 대류열전달계수가 증가하는 것으로 나타났다. 아울러 일정한 유속조건에 대하여 나노입자의 농도가 증가하면 나노 유체의 평균 대류열전달계수도 증가함을 보였다. 총합열전달계수는 대류열전달계수와 같은 경향을 보이므로 유입유량이 증가할수록 그리고 입자의 체적농도가 증가할수록 총합열전달계수 크기는 증가하게 된다.

유체의 유동방향에 따라 총합열전달계수의 크기

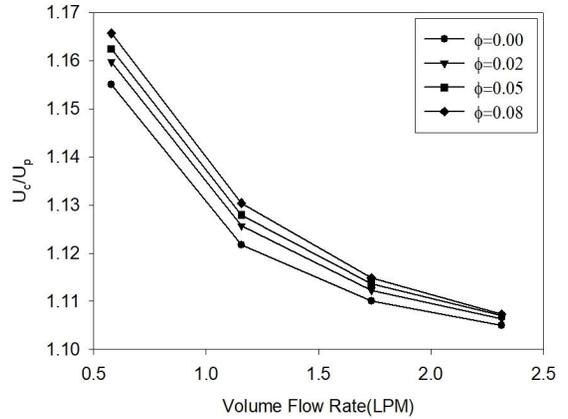


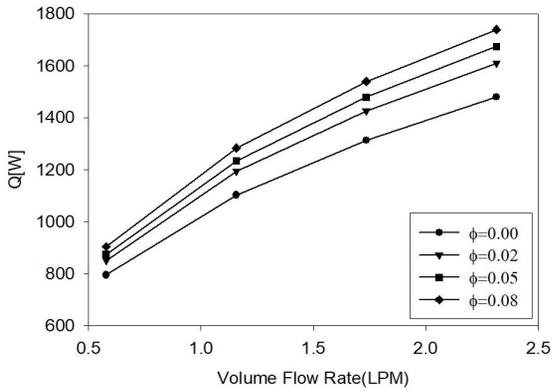
Fig. 5 Overall heat transfer coefficient ratio versus volume flow rates for various concentrations

를 비교하였다. Fig. 5는 평행유동 총합열전달계수(U_p)와 대향유동 총합열전달계수(U_c)의 비(U_c/U_p)를 나타낸 그림이다. 유입유량이 적은 경우 기본유체($\phi=0$)에 대하여 평행유동 대비 대향유동의 총합열전달계수 크기, U_c/U_p 의 상승이 15%정도이고 나노유체인 경우는 최대 17%정도로 나타났다. 총합열전달계수는 유체의 종류와 상관없이 유동의 방향에 따라 크기가 변화하고 기본유체에서 나노유체로 바뀌에 따른 영향은 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 유입유량이 증가하면 U_c/U_p 의 크기는 나노입자의 체적농도와 상관없이 점점 줄어들어 10%정도 향상됨을 볼 수 있다. 유입유량이 증가하면 나노입자의 체적농도의 영향은 거의 없고 기본유체의 U_c/U_p 와 비슷한 크기를 가진다. 이는 유입유량이 증가하면 유동의 방향에 상관없이 관벽에서의 경계층 두께가 더 얇아져 대향유동과 평행유동의 총합열전달계수 비 U_c/U_p 는 유체의 종류보다는 경계층의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다.

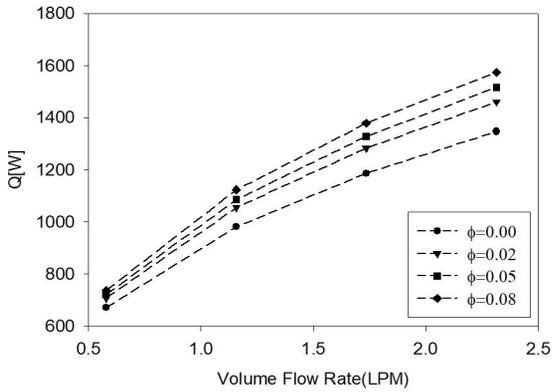
3.3 열전달율

고온유체인 원형관과 저온유체인 환형관 내부의 나노유체간의 열전달율(Q)을 식(22)에서 구하였다.

$$Q = \dot{m}_h C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c C_c (T_{c,o} - T_{h,i}) \quad (22)$$



(a) Counter flow



(b) Parallel flow

Fig. 6 Heat transfer rate versus volume flow rates for various concentrations

여기서, C , \dot{m} 및 T 는 각각 비열, 질량유량 및 온도를 나타내며, 하첨자 i 및 o 는 입구 및 출구, c 및 h 는 저온유체 및 고온유체를 의미한다.

Fig. 6은 열전달율(Q)의 크기를 나타낸 그림이다. 유입유량이 증가하면 속도가 상승하여 기본유체 뿐만 아니라 나노유체의 대류열전달계수가 커짐으로 인해 총합열전달계수가 증가하여 열전달율도 증가한다. 나노입자의 농도가 일정한 경우 유입유량이 증가하면 열전달율은 증가하지만 기본유체 대비 나노유체의 열전달율의 증가폭은 아주 미미하다. 하지만 나노입자 농도가 증가하면 기본유체 대비 나노유체의 열전달율이 $\phi=0.08$ 인 경우 대향유동인 경우 최대 17%, 평행유동인 경우 16% 향상됨을 볼 수 있다.

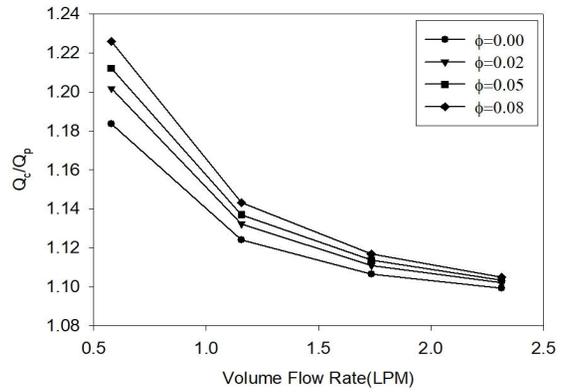
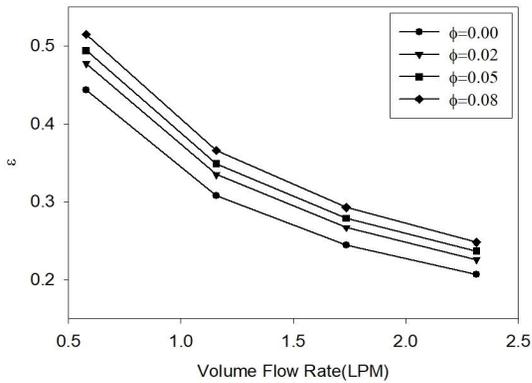


Fig. 7 Heat transfer rate ratio versus volume flow rates for various concentrations

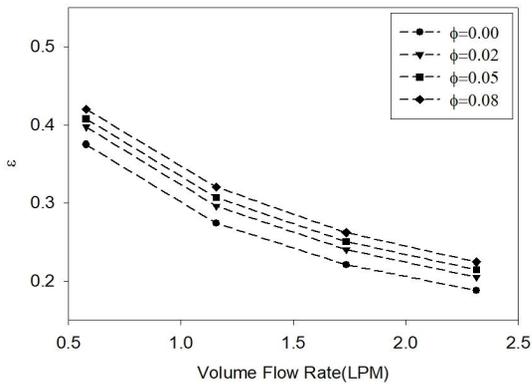
이중관형 열교환기에서의 고온의 나노유체와 저온의 나노유체간의 유동방향은 평행유동 그리고 대향유동으로 구성할 수 있다. 이러한 유동방향은 나노유체의 열전달율 크기에 영향을 끼치게 된다. 아울러 유입유량 크기와 나노입자의 체적농도의 크기도 중요한 변수가 된다. 평행유동 열전달율(Q_p) 대비 대향유동의 열전달율(Q_c)의 비(Q_c/Q_p)를 Fig. 7에 나타내었다. 유입유량이 적은 경우 고온 및 저온유체가 기본유체인 경우($\phi=0$) 대향유동의 열전달율이 평행유동인 경우보다 18%정도 증가함을 보여주고 있고 체적농도가 큰 경우($\phi=0.08$) 22%정도 상승됨을 볼 수 있다. 유입유량이 증가하면 평행유동과 대향유동 모두 대류열전달계수가 증가하게 되므로 Q_c/Q_p 의 값은 점점 줄어든다. 또한 유입유량이 증가하면 기본유체와 나노유체간의 Q_c/Q_p 크기는 비슷한 값을 가지게 됨을 볼 수 있어 유체의 종류(기본유체 또는 나노유체)보다는 유체의 유동방향이 더 중요함을 알 수 있다.

3.4 유용도(effective of heat transfer)의 변화

열교환기의 설계방법에서 고온유체 및 저온유체의 입구와 출구온도가 결정되면 대수평균온도차법(LMTD)을 이용하여 열전달율 및 전열면적을 쉽게 구할 수 있다. 하지만, 입구와 출구의 온도가 결정되지 않은 경우 LMTD를 이용한 설계기법은 반복적 계산을 통해 문제를 풀어야하는 문제점을 안고 있다. 이 경우 열전달율이 결정되어 있는 상태에서는



(a) Counter flow



(b) Parallel flow

Fig. 8 Effective of heat transfer versus volume flow rates for various concentrations

유효도를 사용하면 보다 쉽게 열교환기에 대한 설계가 가능하다. 이중관형 열교환기에서 대향유동 및 평행유동의 유효도는 다음 식(23)과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{Q_{max}} = \frac{(\dot{m}C)_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{(\dot{m}C)_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (23)$$

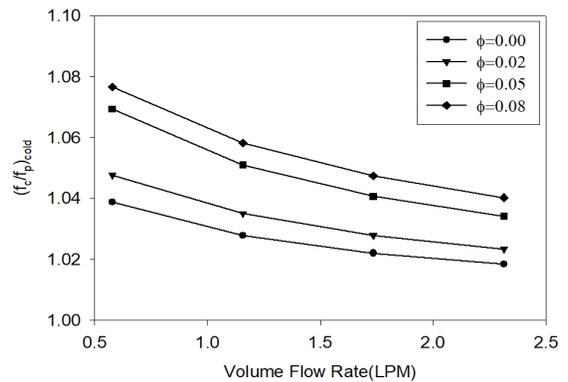
여기서, 하첨자 act, max, min은 해석결과, 최대값, 최소값을 의미한다.

Fig. 8은 대향유동과 평행유동 조건에서 유입유량과 입자의 체적농도 변화에 대한 유효도를 나타낸 그림이다. 유동의 방향과 관계없이 입구의 유입유량이 증가하면 고온유체 또는 저온유체의 입구와 출

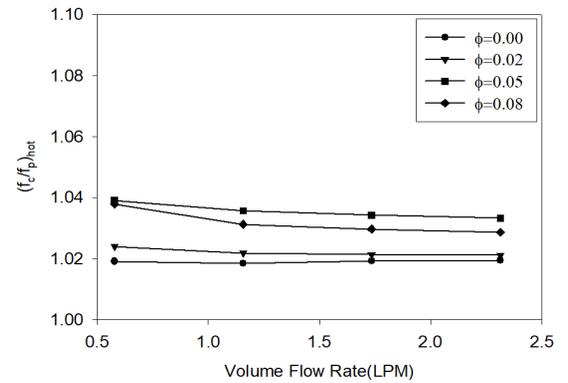
구간의 온도차가 적어지므로 유효도가 낮아진다. 동일한 유량에서 나노입자의 체적농도를 증가시키면 열전도도가 커져 열전달이 활발히 일어나므로 입구와 출구사이의 온도차가 커지게 되며 이로 인하여 유입유량과 관계없이 유효도가 증가함을 보였다. 동일한 유입유량과 입자 체적농도 조건하에서 대향유동의 유효도가 평행유동의 유효도보다 높은 값을 가진다. 이는 식(23)에서 최대열전달율은 유동의 방향에 상관없이 같은 값이므로 대향유동의 열전달율이 평행유동의 열전달율보다 큰 값을 가지기 때문이다.

3.5 마찰인자(friction factor)의 변화

열교환기 설계에서 마찰에 의한 압력강하는 펌프의 용량선정에 있어서 매우 중요한 물리량이 된다.



(a) Cold fluid



(b) Hot Fluid

Fig. 9 Friction factor ratio versus volume flow rates for various concentrations

관 내부유동에서 압력강하는 관의 벽과 유체의 점성으로 인한 마찰의 영향이며 그 크기는 마찰인자(f)로 나타내어지고 식(24)과 같다.

$$f = \frac{D_h}{L} \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} \quad (24)$$

여기서 D_h 및 L 은 수력직경 및 관의길이를 나타내며, ΔP 는 입구와 출구간 압력차, V 는 고온유체 및 저온유체의 평균속도를 나타낸다.

Lim등^[17]의 연구에 따르면 나노 유체의 주어진 체적농도에 대해 체적유량이 증가하면 압력강하량도 증가하지만 그 증가량보다는 유속증가로 인한 관성력의 상승량이 더 커지기 때문에 마찰인자는 감소하는 경향을 보인다. Fig. 9는 유동방향이 마찰인자에 미치는 정도를 나타내는 그림이다. 고온유체와 저온유체 모두 대향유동 마찰인자(f_c)가 평행유동의 마찰인자(f_p)보다 큰 값을 가진다. 그리고 고온유체보다는 저온유체에서 f_c/f_p 의 크기가 다소 큰 값으로 나타나는데 이는 저온에서 점성계수가 약간 증가하여 나타난 현상으로 파악된다.

4. 결 론

본 연구는 이중관형 열교환기에서 나노유체의 유입유동 방향(대향유동 및 평행유동)에 따른 열전달 및 유동특성에 관한 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 총합열전달계수와 총합열전달계수는 유입유량과 나노농도가 증가할수록 커진다.
2. 동일한 체적농도, 유입유량에서 대향유동 열전달율이 평행유동의 열전달율 보다 향상되었다.
3. 나노유체의 유입유량이 증가할수록(유속증가) 마찰인자는 감소하였다. 동일 유량에서 나노입자 체적농도가 증가하면 점성계수가 증가하게 되므로 마찰인자도 증가하였으나 평행유동 대비 대향유동의 마찰인자 증가폭은 커지지 않았다.

후 기

“이 논문은 2021-2022년도 창원대학교연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Maxwell, J. C., Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, UK, 1873.
2. Choi, S. U., & Eastman, J. A., “Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles Developments and Applications of Non-Newtonian Flow,” ASME, FED 231/MD 66, pp. 99-105, 1995.
3. Lee, S., Choi, S. S., Li, S. A., & Eastman, J. A., “Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles,” J. Heat Transf, Vol. 121, pp. 280-289, 1999.
4. Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. & Hishinuma, N., “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), Vol. 4, pp. 227-233. 1993.
5. Mahian, O., Kianifar, A., Kalogirou, S. A., Pop, I., & Wongwises, S., “A review of the applications of nanofluids in solar energy,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 57, pp. 582-94. 2013.
6. Mirmasoumi, S., & Behzadmehr, A., “Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube,” International journal of heat and fluid flow, Vol. 29, pp. 557-566. 2008.
7. Maiga, S. E. B., Palm, S. J., Nguyen, C. T., Roy, G., & Galanis, N., “Heat transfer enhancement by using nanofluids,” International journal of heat and fluid flow, Vol. 26, No. 4, pp. 530-546. 2005.
8. Choi, H. K., & Yoo, G. J., “Numerical study on nanofluids forced convection in circular tubes,”

- Journal of computational fluids engineering Vol. 19, pp. 37-43. 2014.
9. Choi, H. K., & Lim, Y. S., "Numerical study of mixed convection nanofluid in horizontal tube," Journal of Convergence for Information Technology, Vol. 9, No. 8, pp. 155-163. 2019.
 10. Farajollahi, B., Etemad, S. G., & Hojjat, M., "Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 12-17. 2010.
 11. Pak, B. C., & Cho, Y. I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," Experimental Heat Transfer, Vol. 11, pp.151-170. 1998.
 12. El-Maghlany, W. M., Hanafy, A. A., Hassan, A. A., & El-Magid, M. A., "Experimental study of Cu-water nanofluid heat transfer and pressure drop in a horizontal double-tube heat exchanger," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 78, pp. 100-111. 2016.
 13. Darzi, A. R., Farhadi, M., & Sedighi, K., "Heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃-water nanofluid in a double tube heat exchanger," International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 105-112. 2013.
 14. Esfe, M. H., & Saedodin, S., "Turbulent forced convection heat transfer and thermophysical properties of MgO-water nanofluid with consideration of different nanoparticles diameter, an empirical study," Journal of thermal analysis and calorimetry, Vol. 119, pp. 1205-1213. 2015.
 15. Aghayari, R., Maddah, H., Zarei, M., Dehghani, M., & Mahalle, S.G.K., "Heat transfer of nanofluid in a double pipe heat exchanger," International Scholarly Research Notices Article, Vol. 2014 , pp. 1-7. 2014.
 16. Sudarmadji, S., Soeparman, S. Wahyudi, S., & Hamidy, N., "Effects of cooling process of Al₂O₃-water nanofluid on convective heat transfer," Faculty of Mechanical Engineering Transactions, Vol. 42, pp. 155-161. 2014.
 17. Lim, Y. S., & Choi, H. K., "Numerical study of forced convection nanofluid in double pipe," J. of Convergence for Information Technology, Vol. 9, pp. 147-156. 2019.
 18. Khanafer, K., & Vafai, K., "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 4010-4428. 2011.
 19. ANSYS Fluent, V.19 User Guide, ANSYS Inc., 2019.
 20. Vajjha, R. S., & Das, D. K., "Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 4675-4682. 2009.
 21. Zonouzi, S. A., Aminfar, H., & Mohammadpourfard, M., "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, Vol. 15, pp. 512-521. 2014.
 22. Kim, D., Kwon, Y., Cho, Y., Li, C., Cheong, S., Hwang, Y., Lee, J., Hong, D., & Moon, S., "Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions," Current Applied Physics, Vol. 9, pp. 119-123. 2009.