

이중관 내부 나노유체의 강제대류에 관한 수치적 연구

임윤승¹, 최훈기^{2*}

¹창원대학교 기계공학부 대학원생, ²창원대학교 기계공학부 교수

Numerical Study of Forced Convection Nanofluid in Double Pipe

Yun-Seung Lim¹, Hoon-Ki Choi^{2*}

¹Student, Mechanical Engineering, Changwon National University

²Professor, Mechanical Engineering, Changwon National University

요약 동심 이중관에서 기본유체 물과 나노입자 산화알루미늄의 혼합인 나노유체를 적용한 대향유동을 유한체적법의 수치적 방법으로 열전달 특성을 규명하였다. 고온유체는 내부 원형관으로 흐르며 열을 외부 환형관으로 흐르는 저온유체로 전달한다. 고온유체와 저온유체의 체적유량 및 나노입자의 체적농도를 변수로 두어 열전달 및 유동 특성을 조사했다. 결과는 나노입자의 체적농도와 체적유량의 증가함에 따라 열전달 성능이 증가함을 보였다. 외부와 내부 관 모두에서 나노유체인 경우가 기본유체보다 나노입자의 체적농도가 8%일 때 나노유체가 열전달 성능이 최대 17% 증가하는 것을 확인했다. 또한 기본유체에 비해 환형관의 대류열전달 계수는 최대 31% 증가함을 보였으며 열교환기의 유용도는 약 20%가 상승함을 확인하였다. 하지만 나노입자의 체적농도가 8%일때 마찰인자가 최대 136% 커지는 것을 확인하였다.

주제어 : 나노유체, 대향유동, 체적농도, 동심 이중관, 대류열전달계수, 열전달율

Abstract Numerical study was performed to investigate the convective heat transfer of Al_2O_3 /water nanofluid flowing through the concentric double pipe counterflow heat exchangers. Hot fluid flowing through the inner pipe transfers its heat to cooling fluid flowing in the outer pipe. Effects of important parameters such as hot and cold volume flow rates, fluid type in the outer and inner pipes, and nanoparticles concentration on the heat transfer and flow characteristics are investigated. The results indicated that the heat transfer performance increases with increasing the hot and cold volume flow rates, as well as the particle concentrations. When both outer and inner pipes are nanofluids with 8% nanoparticle volume concentration, nanofluids showed up to 17% better heat transfer rate than basic fluids. Also, the average heat transfer coefficient of the base fluid for annulus-side improved by 31%. Approximately 20% enhancement in the heat exchanger effectiveness can be achieved with the addition of 8% alumina particles in base fluid. But, addition of nanoparticles to the base fluid enhanced friction factor by about 196%.

Key Words : Nanofluid, Counter Flow, Volume Concentration, Concentric Doublepipe, Convective Heat Transfer Coefficient, Heat Transfer Rate

*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 October 18, 2019

Revised November 19, 2019

Accepted December 20, 2019

Published December 28, 2019

1. 서론

1.1 서론

산업계에서 사용하고 있는 열교환기의 열전달 성능향상은 가격, 운전비용, 무게, 설치공간의 관점에서 매우 중요하다. 기존의 열교환기에서 사용하고 있는 물, 기름, 에틸렌글리콜 (Edylene Glycol, EG)과 같은 전통적인 작동유체의 낮은 열전도율은 열전달 성능향상에 있어 큰 문제점 중의 하나였다. 이 문제를 극복하는 방법 중 하나는 작동유체에 열전도도가 큰 미립의 고체 입자를 분산시켜 고체-액체의 혼합물을 만들어 열전도도를 높이는 방법이다. 1873년 Maxwell[1]의 연구는 유체에 마이크로미터 또는 밀리미터 크기의 고체입자를 분산시키고 체적농도분율을 증가시킴으로써 유체-고체 혼합물의 열전도도를 증가시키는 가능성을 보여주었다. 물론 이러한 입자들이 채널 내부에 침전이 되어 열전달 성능을 현저히 떨어뜨리고, 영킴이 발생하는 현상이 나타났다. 이로 인하여 압력강하가 크게 나타나기도 하였으며 나아가 벽면과 입자들의 마찰로 인하여 점진적으로 배관 벽면 침식이 발생되어 파손으로 이어지기는 몇 가지 문제를 발생시키기도 하였다. 이런 밀리미터의 입자대신 지난 수년 동안 나노미터 크기의 입자를 만드는 기술이 향상되었고 나노유체라고 불리는 새로운 종류의 고체-액체 혼합물을 만들 수 있었다. 나노유체는 물과 같은 기본유체에 균일하고 안정적으로 분산되어있는 소량의 나노입자(일반적으로 100nm 미만)를 포함하는 발전한 형태의 액체다. 물이나 EG와 같은 열전도도가 낮은 재래식 액체에 소량의 고체 나노입자가 분산되면 열전도도가 현저히 증가하게 된다.

나노 유체의 열전도도는 여러 종류의 기본유체에 대하여 다양한 나노입자의 체적분율, 입자의 재료 종류 및 입자의 형상에 대하여 많은 연구자들에 의하여 실험되어졌으며, 나노유체의 열전도도가 기본유체보다 높다는 것을 보여주었다. Choi [2]는 열전달을 향상시키고 열장치의 크기, 무게 및 비용을 줄이며 압력강하에 큰 영향을 받지 않는 나노유체의 장점을 정량적으로 분석하였다. 금속 나노유체의 평균입자 크기가 10nm이하인 Cu에 대하여 약 0.3% 체적분율을 함유하는 에틸렌글리콜로 구성된 나노유체의 경우 유효 열전도도는 최대 40% 증가했음을 보였다. Lee등[3]은 물 또는 에틸렌글리콜의 기본유체에 대하여 CuO 또는 Al₂O₃ 나노입자

를 분산시켜 만든 산화물 세라믹 나노유체의 열전도도가 향상됨을 입증했다. 하지만 평균직경이 40nm인 더 큰 입자는 10% 미만의 열전도도가 증가함을 보였다. Masuda등[4]은 4.3% 체적분율, 평균직경 13nm의 Al₂O₃ 나노입자를 사용하면 정지상태에서 물의 열전도도가 30% 증가함을 보였다. 또한 나노입자가 기본유체에서 열전달 향상에 기여하는 메커니즘을 제안하였다. Xuan등[5,6]은 유체의 에너지 교환을 가속하는 나노입자의 무질서한 움직임으로 인한 열분산 증가와 나노유체의 열전도도 향상이라는 두 가지 원인을 밝혀냈다. Keblinski등[7]은 나노유체 열전달 증가에 기여하는 4가지 가능한 메커니즘, 즉 입자의 브라운 운동, 액체와 입자 계면에서 분자수준의 층화, 나노 입자에서의 탄도(ballistic)열전달, 나노입자의 덩이(clustering)임을 제시했다.

오랫동안 많은 연구자들이 다양한 유동조건과 기하학적 형상을 변화시키며 나노유체의 유동 및 열적인 거동을 수치해석 및 실험을 통하여 연구하였다. Xuan등 [5]와 Pak등[8]은 튜브내에서 나노유체의 층류 및 난류유동에서의 대류 열전달현상을 실험적인 방법으로 연구를 수행하였다. 그들은 물-Cu, 물-TiO₂ 및 물-Al₂O₃로 구성된 나노유체를 사용하여 Nusselt수에 대한 경험적 상관관계식을 구했다. Rea등[9]은 수직 가열 튜브에서 알루미늄-물의 나노유체에 대한 층류 대류 열전달 및 압력 손실에 대한 연구를 수행하였다. Mirmasoumi등[10]은 층류유동인 경우 혼합대류 조건에서 나노입자 평균 직경의 크기가 수평원관에서 열전달 및 유동 거동에 미치는 영향을 연구했다. 나노입자가 감소함에 따라 대류 열전달계수가 크게 증가한다는 것을 보여주었다. Maiga등[11]은 수치해석을 통하여 나노입자의 체적농도 및 Reynolds수를 변화시키며 열전달 특성을 구하였다. 체적농도 및 Reynolds수가 증가하면 대류 열전달계수가 증가함을 보였다. Choi등[12]은 원형관 내부 나노유체의 강제대류 열전달에서 수력학적 및 열적 발달과정 현상에 대한 연구를 수행하였다. 수력학적 및 열적 완전발달길이는 Reynolds수가 증가할수록 길어지고 열적 발달길이는 나노유체의 체적농도가 증가할수록 짧아짐을 보였다.

나노유체 대류열전달에 대한 수치적 계산은 일반적으로 두 가지 다른 접근방식, 즉 단상 접근방식과 2상 접근방식으로 나눌 수 있다. 단상접근법은 유체상과 나노

입자가 열평형 상태에 있고 동일한 속도로 움직인다고 가정한다. 이 접근법은 간단하고 계산 시간이 적게 소요되는 장점이 있어 나노유체를 이용한 대류 열전달에 대한 여러 이론적 연구[10-12]에 있어 이 접근법을 많이 사용하였다. 그러나 Ding등 [13]은 나노입자의 분포는 해당하는 Peclet수가 항상 10보다 작을 경우에만 균일하다고 가정하고 단상접근법을 사용할 수 있으며 10보다 큰 경우는 2상 접근법이 더 적합하다고 기술하였다. Choi등[14]은 2상 접근법을 적용한 수치해석을 이용하여 원형관에서 혼합대류 열전달특성을 구하였다. Richardson수의 크기와 나노입자의 체적분율에 대한 대류열전달계수와 벽면의 전단응력을 구하였다. 최근 Behzadmehr등[15]은 2상 접근법을 사용하여 원형 튜브에서 나노유체의 난류 강제대류를 연구했다. 그들은 나노유체를 연구하기 위해 2상 혼합물 모델을 구현했다. 실험결과와의 비교를 통해 혼합물 모델이 단상 모델보다 더 정확하다는 것을 알 수 있었다.

이중관형 열교환기는 산업용으로 많이 사용되고 있는 열교환기이므로 열전달 메커니즘에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. Gupta등[16]은 유한 차분법을 사용하여 환형 튜브내부에서 층류인 유동조건에 대하여 발달과정 영역에 대하여 수치적 방법으로 연구를 수행했다. 매우 작은 환형비율에 대해 원형 파이프의 결과와 상당히 다른 결과를 발견했다. El-Shaarawy등 [17]은 환형관의 발달과정 영역에서 층류-천이영역의 대류열전달 현상을 수치적으로 구했다. 외부경계 가열이 내부경계 가열보다 열전달 특성이 더 좋아짐을 발견했다. Lu등 [18]은 좁은 환형관에서 물의 대류 열전달을 실험적으로 연구했다. 그들은 환형관에서 유체 흐름의 열 특성이 원형관의 열 특성과 다르다는 것을 보여주었다. 층류에서 난류로의 천이는 원형관과 비교하여 조금 낮은 Reynolds수에서 발생됨을 보였다. 이러한 연구들에서 볼 수 있듯이 환형관에서의 열전달 메커니즘은 매우 복잡하다. 또한 작동유체가 나노유체인 경우는 더 복잡한 열전달 거동을 하게 된다. 이중관 열교환기는 환형관 내부에 원형관이 삽입되어있는 기하학적 형상을 한다.

앞선 연구자들은 대부분 환형관만 연구대상의 영역으로 하였지만 본 연구에서는 환형관 뿐만 아니라 내부의 원형관도 해석 대상영역으로 선정하여 실제의 이중관과 유사한 기하학적인 구성을 하는 복합적인 해석을 수행하였다.

한편, 환형관 내부유체와 원형관 내부유체 사이 서로 열교환을 하므로 환형관과 원형관의 작동유체 종류의 구성도 매우 중요하게 된다. 본 연구에서는 우선적으로 원형관-환형관 내부유체를 기본유체-기본유체, 기본유체-나노유체, 나노유체-기본유체, 나노유체-나노유체의 4가지 조합을 구성하여 열전달 특성을 비교 한다. 4가지 조합 중 최종적으로 열전달 성능이 가장 우수한 조합에 대하여 나노입자의 체적농도 크기와 입구 체적유량의 크기를 변화시키며 열전달 및 유동특성을 구한다.

2. 수치해석 방법

2.1 형상정보 및 지배방정식

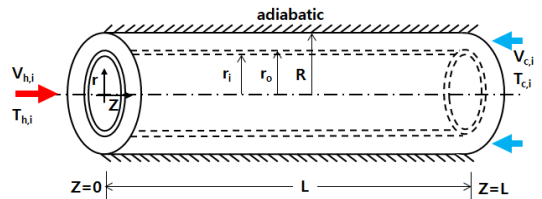


Fig. 1. Definition of numerical domain

Fig. 1은 본 연구의 전산해석에 사용된 해석영역을 도시화한 것이다. 원형관과 환형관의 내경이 각각 r_i 및 R 이고 길이가 L 인 이중관 내부에 기본유체인 물에 나노입자 알루미늄(Al_2O_3)를 혼합한 나노유체를 유입시킨다. 환형관에 저온유체를, 원형관에 고온유체가 서로 대향유동으로 흐르게 구성한다. 일반적으로 나노유체 입자크기 (d_p)는 100nm이하로 하는데 본 연구에서는 $d_p=47nm$ 의 나노입자를 사용하였다. 나노유체는 액체-고체의 혼합이므로 특성을 모사하기 위해 혼합모델[19]을 사용하였다. 나노유체의 물성치는 식(14)-(15)와 같이 나노입자 체적농도 및 온도와 함수관계가 있으므로 Reynolds수가 관의 길이방향의 위치에 따라 온도값이 달라져 물성이 변화한다. 또한 체적농도의 크기에 따라 많이 바뀌므로 본 연구에서는 모든 조건을 고려한 Reynolds수가 2000이하이며 따라서 층류유동이다. 나노유체의 유동현상을 구하기 위하여 다음과 같은 지배방정식들(1-4)이 사용되었다.

연속방정식:

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \tag{1}$$
 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:

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

체적분율 방정식:

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

여기서 ρ , μ , k 및 c_p 는 밀도, 점성계수, 열전도도 및 비열을 나타내며, 하첨자 m 은 나노유체, p 는 나노입자, f 는 기본유체를 의미한다. V_m 은 질량평균속도, $V_{dr,p}$ 는 드리프트 속도를 나타낸다.

2.2 나노유체의 물성치

물과 나노입자가 섞인 나노유체의 물성치는 나노입자의 크기(d_p), 나노입자의 체적농도(ϕ), 온도(T) 등 여러 인자들과 복잡한 함수관계로 나타난다. 이러한 이유로 나노유체의 물성치는 실험적 결과를 바탕으로 상관관계식을 만들어 사용한다. 나노유체의 전산해석을 위해 다음과 같은 물성치를 사용하였다. 나노유체의 밀도(ρ_m)와 비열($c_{p,m}$)은 혼합모델식[19](12-13)을 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)는 Vafai & Khanafer[20]이 제안한 모델식(14)을 사용하였고, 열전도도(k_m)는 Vajjha & Das[21]가 제안한 모델식(15)을 사용하였다. 점성계수와 열전도도식은 온도와 체적농도의 함수로 나타내었다.

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

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

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

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

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

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

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

Al_2O_3 는 Mohammadpourard등[22]의 연구에 사용된 물성치를 사용하였으며 Table 1에 나타내었다.

기본유체는 물을 사용하였고 밀도(ρ_f), 점성계수(μ_f), 열전도도(k_f)는 온도의 영향을 고려하여 식(16)-(18)과 같이 나타내었다. 비열($c_{p,f}$)은 4200[kJ/kg.K]로 일정한 값을 주었다.

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

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

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

Table 2는 위 관계식을 이용했을 때 상온(25°C)에서 나노입자 체적농도별 나노유체의 물성치를 나타낸 표이다. 밀도 및 열전도도는 체적농도에 선형적으로 증가하지만 점성계수는 $\phi = 0.08$ 에서 급격히 증가한다.

2.3 경계조건

지배방정식은 비선형 미분방정식이므로 해를 구하기

위하여 적합한 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 환형관 내부로(저온유체) 흐르는 유체의 입구온도($T_{c,i}$)를 298K, 원형관 내부로(고온유체)에서 입구온도($T_{h,i}$)가 343K인 나노유체가 주어진 크기의 체적유량으로 유입된다. 출구는 압력경계조건을 주어 대기압이 유지되도록 하였으며 관 내부 벽면은 no-slip 조건을 적용하였다.

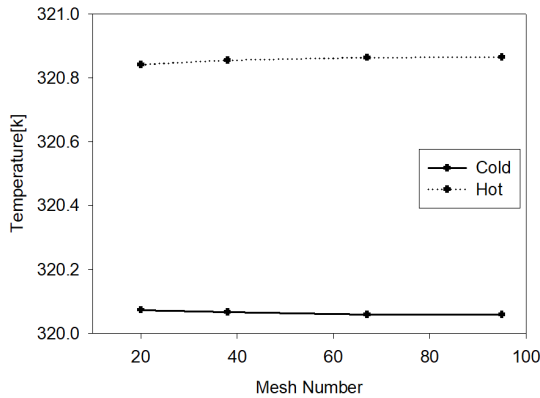


Fig. 2. Grid independence tests(Temperature at each outlet)

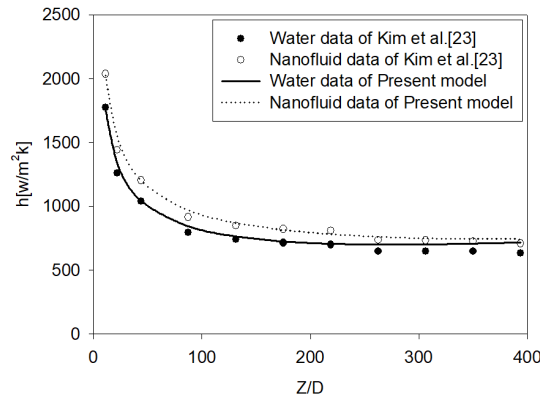


Fig. 3. Comparison of axial evolution of the convective heat transfer coefficient with the corresponding experimental data [23]

2.4 수치해석 검증

본 연구에서는 상용프로그램인 ANSYS FLUENT [1] 이를 사용하였다. 본 연구의 수치해석에는 67만개의 격자를 적용하였다. 적용한 격자계의 타당성을 검증하기 위하여 20만개, 38만개, 67만개 그리고 95만개의 격자수인 경우 출구온도의 최대값으로 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 격자수 38만개부터 출구 온도의 크기가 차이

나지 않음을 볼 수 있듯이 적용한 격자수는 타당함을 보여주고 있다. 나노유체에 대한 수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Kim 등[23]이 수행한 실험의 대류열전달계수와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 대류열전달계수가 최대 7%, 평균 3%이내의 오차를 가지므로 크기와 경향이 잘 일치하여 적용한 수치적 모델도 타당함을 볼 수 있다. 지배방정식에 대한 수치해석의 잔차가 10^{-5} 으로 충분한 수렴 후 연산을 종료하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

환형관과 원형관 모두 Al_2O_3 -물의 나노유체로, 유동의 방향은 서로 대향유동으로 구성하였다. 열전달 및 유동특성은 열전달율, 평균열전달계수, 총합열전달 계수, 평균온도차, 유용도 및 마찰인자로 나타내었다. 열전달 성능에 유속의 영향뿐만 아니라 나노입자의 체적농도의 영향도 파악하였다.

3.1 기본유체와 나노유체의 조합

환형관내부로 흐르는 유체(저온유체)와 원형관 내부로 흐르는 유체(고온유체)의 구성을 Table 3과 같이 기본유체-기본유체(BW), 기본유체-나노유체(HN), 나노유체-기본유체(CN), 나노유체-나노유체(BN)의 4가지로 구성을 할 수 있다. 4가지의 조합을 통하여 열전달 성능을 비교하여 본 연구에서 적용할 조합을 찾는다. 4가지 유체조합에 대하여 유입유량의 변화에 따른 열전달율의 크기 비교를 Fig. 4에 나타내었다. 유입유량의 크기가 증가하면 4가지 조합 모두 대류열전달계수가 증가하므로 열전달율도 증가함을 보였다. 동일한 유량조건에 대하여 환형관과 원형관 모두 기본유체를 유입시킨 경우보다 환형관 또는 원형관 어느 한 관에 나노유체를 유입한 경우가 훨씬 전열효과가 향상됨을 볼 수 있다. 그리고 환형관과 원형관의 양쪽 모두 나노유체를 유입시킨 경우가 가장 전열효과가 우수하게 나타났다. 환형관과 원형관 모두 기본유체를 유입한 경우(BW)에 대비 모두 나노유체를 유입한 경우(BN)가 체적농도 8%에서 열전달율이 17%의 상승함을 보였다. 따라서 원형관과 환형관 모두 모두 나노유체를 유입한 조합을 본 수치해석의 대상 조합으로 한다.

Table 3. Combination between basic fluid and nanofluid

Annulus	Circular tube	Symbol
Base Fluid	Base Fluid	BW
Base Fluid	Nano-Fluid	HN
Nano-Fluid	Base Fluid	CN
Nano-Fluid	Nano-Fluid	BN

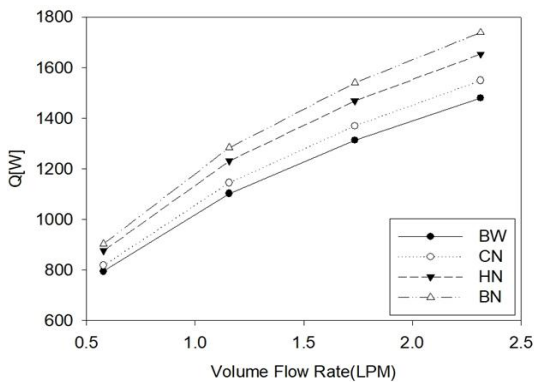


Fig. 4. Heat transfer rate versus volume flow rates for various Case

3.2 대류 열전달계수

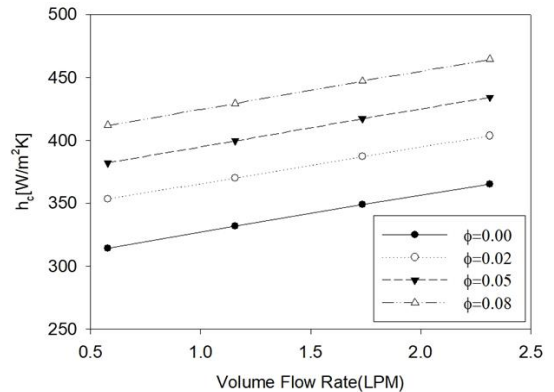
열전달 성능을 평가하기 위한 대류열전달계수는 식 (19)과 같으며, 길이방향(z)으로만 그 크기가 변화한다.

$$h(z) = \frac{-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i \text{ or } r=r_o}}{(T_w(z) - T_b(z))} \quad (19)$$

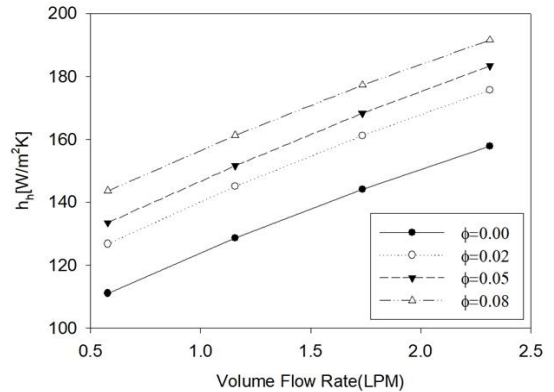
여기서, h, T는 대류열전달계수 및 온도이며, 하첨자 w는 벽면온도, b는 평균온도를 의미한다.

Fig. 5는 고온유체와 저온유체에서의 서로 다른 체적 유량 조건에서 길이방향(z)으로 평균을 취한 대류열전달 계수에 대하여 나노입자 체적농도의 영향을 보여주는 그림이다. 유입유량이 증가하면 대류열전달계수가 증가하는 것으로 나타났다. 온수 및 냉수 유량을 증가시키면 온도 경계층이 얇아지므로 기본유체뿐만 아니라 나노유체의 대류 열전달계수도 증가하게 된다. 일정한 유속조건에 대하여 나노입자의 체적농도가 증가하면 나노 유체의 평균 대류열전달계수는 기본 유체의 대류열전달계

수보다 높게 나타났다. 8% 알루미늄 나노입자 농도에서 고온 유체와 저온유체에서의 대류열전달계수는 최대 31%가 향상됨을 보였다. 주어진 체적농도에 대하여 나노유체 대류열전달계수의 증가는 기본유체인 물보다 큰 나노 유체의 열전도도에 기인한 것과 나노입자의 무질서 운동(chaotic movement)으로 인한 큰 에너지 교환과정의 원인으로 판단된다. 낮은 유속에서, 나노입자의 응집이 발생하여 열전달 향상을 감소시킬 수 있다. 그러나 높은 유속에서 응집 효과는 현저히 감소되고 나노입자의 분산은 혼합을 강화시켜 열전달 계수를 상당히 증가시킨다.



(a)



(b)

Fig. 5. Average convective heat transfer coefficient versus volume flow rates for various concentrations: (a) cold fluid, (b) hot fluid

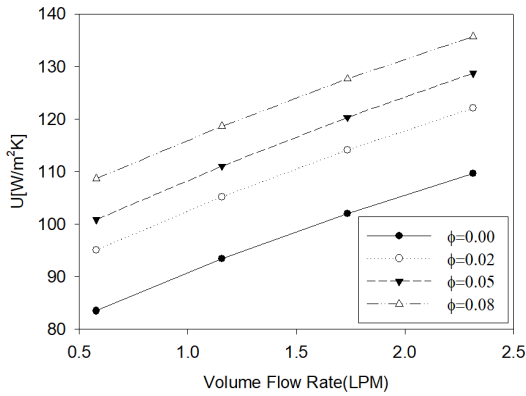


Fig. 6. Overall heat transfer coefficient versus volume flow rates for various concentrations

3.3 총합열전달계수

환형관과 원형관 내부 나노유체간의 총합열전달계수 (U)를 고온유체와 저온유체의 대류열전달계수로 표현 되는 열저항 관계식은 식(20)에서 구하였다. 이 경우 원형관벽에서의 열전도는 매우 큰 값이므로 이 벽에서의 전도열저항은 무시하였다.

$$U = \frac{1}{1/h_h + 1/h_c} \quad (20)$$

Fig. 6은 총합열전달계수를 나타낸 그림이다. 식 (20)에서와 같이 총합열전달계수는 대류열저항의 합으로 나타나므로 대류열전달계수와 비슷한 경향을 한다. 유입유량과 나노입자 체적농도가 증가함에 따라 총합열 전달계수의 절대 크기는 증가하지만 유입유량이 증가하면 기본유체($\phi = 0.0$)의 총합열전달계수도 증가하게 되므로 기본유체에 대한 상대적인 값의 크기는 유량의 변화량에 큰 영향을 받지 않음을 볼 수 있다. 나노입자의 체적농도가 증가함에 따라 기본유체 대비 나노유체의 총합열전달계수는 최대 30% 증가함을 볼 수 있다.

3.4 열전달율

원형관과 환형관 내부의 나노유체간의 열전달율(\dot{Q})을 식(21)에서 구하였다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_c C_c (T_{c,o} - T_{h,i}) \quad (21)$$

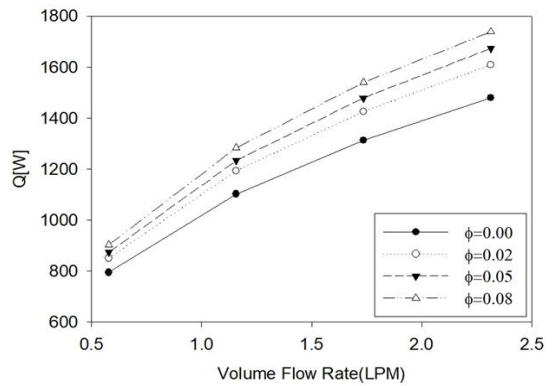


Fig. 7. Heat transfer rate versus volume flow rates for various concentrations

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

Fig. 7는 열전달율의 크기를 나타낸 그림이다. 유입유량이 증가하면 기본유체 뿐만 아니라 나노유체의 대류열전달계수가 커지므로 총합열전달계수가 증가하여 열전달율도 증가한다. 나노입자의 체적농도가 일정한 경우 유입유량이 증가하더라도 기본유체 대비 나노유체의 열전달율 상승은 아주 미미하게 나타났다. 하지만 나노입자 체적농도가 증가하면 기본유체 대비 나노유체의 열전달율이 $\phi=8\%$ 인 경우 최대 17%의 향상됨을 볼 수 있다.

3.5 대수평균온도차

열교환기 해석에서 가장 중요한 것 중의 하나는 고온유체와 저온유체간의 온도차이다. 이런 온도차는 열교환기의 각 지점에 따라 달라지므로 일반적인 입구-출구 온도차인 산술평균온도차로 구하면 오차가 발생된다. 이를 보완하기 위하여 대수평균온도차를 많이 사용한다. 대항류에 대한 대수평균온도차는 식(22)로 구한다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (22)$$

여기서, $\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o}, \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$ 로 표시된다.

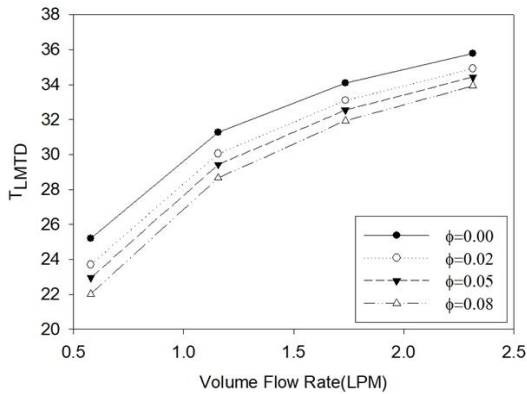


Fig. 8. Mean temperature difference versus volume flow rates for various concentrations

Fig. 8은 대수평균온도차를 나타낸 그림이다. 유입유량이 증가하면 관 내부의 유체속도가 빨라져 속도 및 온도 경계층이 얇게 형성되므로 고온유체와 저온유체간의 평균온도차가 점점 증가하게 된다. 하지만 동일한 유입유량에 대하여 나노입자의 체적농도를 증가시키면 고온유체와 저온유체간의 열전달이 잘 일어나 평균온도차가 줄어들게 됨을 알 수 있다.

3.6 마찰인자(friction factor)의 변화

열교환기 설계에서 열전달성능뿐만 아니라 마찰에 의한 압력강하도 매우 중요한 물리량이다. 관유동에서 압력강하는 관의 벽과 유체의 점성으로 인한 마찰 때문이다. 마찰에 의한 압력강하는 마찰인자(f)로 나타내며 식 (23)과 같다.

$$f = \frac{D_h}{L} \frac{\Delta P}{\rho V^2 / 2} \quad (23)$$

여기서 L , D_h 는 관의길이, 수력직경을 나타내며, ΔP 는 입구-출구간 압력차, V 는 유체의 평균속도를 나타낸다.

유체의 체적유량이 변화하는 경우 저온부 영역에서 나노유체의 마찰인자의 크기를 Fig. 9에 도시하였다. 나노 유체의 모든 체적농도에 대해 유체의 체적유량이 증가함에 따라 마찰인자는 감소하는 경향을 보였다. 이는 체적유량이 증가하면 압력강하량의 증가보다는 유체 관성력의 상승 정도가 더 증가하기 때문이다. 동일한 체적유량에 대하여 나노입자 체적농도가 증가하면 Table 2에서 나타낸 바와 같이 나노입자 체적농도가 $\phi=0.00$,

0.02, 0.05에서는 점성계수의 증가가 크지 않으므로 체적농도의 영향은 크게 받지 않음을 볼 수 있지만 나노유체의 체적농도가 $\phi=0.08$ 에서는 점성계수가 급격히 증가하므로 관의 마찰도 증가하여 마찰인자는 유입유량이 가장 적을 때 최대 136%까지 증가함을 볼 수 있다.

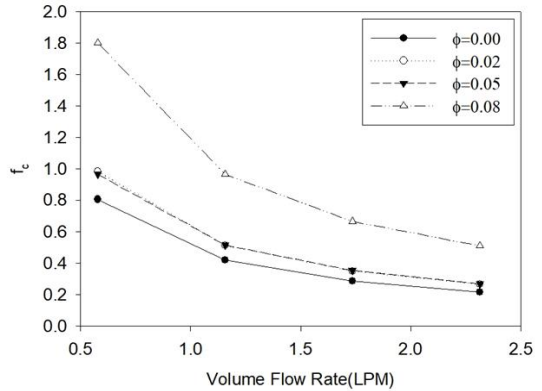


Fig. 9. Friction factor versus volume flow rates for various concentrations

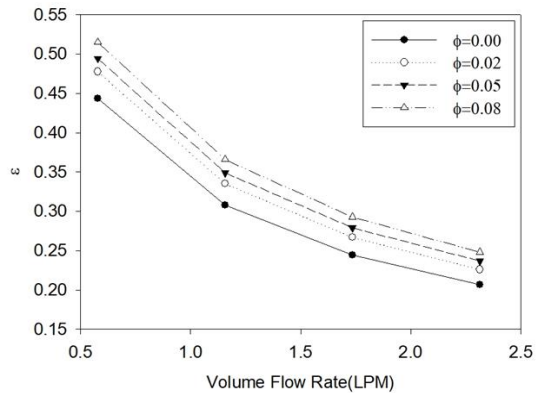


Fig. 10. Effective of heat transfer versus volume flow rates for various concentrations

3.7 유용도(effective of heat transfer)의 변화

열교환기의 설계방법에서 고온유체 및 저온유체의 입구와 출구온도를 알면 대수평균온도차법(LMTD)으로 열전달율, 전열면적 그리고 총합열전달계수를 쉽게 구할 수 있다. 하지만, 입구와 출구의 온도가 주어지지 않는 경우 반복적 계산을 통해 문제를 풀어야하기 때문에 LMTD는 효과적인 방법이 아니다. 이 경우 주어진 양의 열을 전달하는 열교환기의 유용도에 기초를 둔 방법을

활용하면 보다 쉽게 열교환기에 대한 해석이 가능하다. 이중관형 열교환기에서 대향유동인 경우 유용도는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}} = \frac{(\dot{m}C)_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{(\dot{m}C)_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (24)$$

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

Fig. 10은 체적유량에 따라 변화하는 유용도를 나타냈다. 입구의 유입유량이 증가하면 환형관 또는 원형관의 입구와 출구간의 온도차가 작아지므로 유용도가 낮아진다. 동일한 유량에서 나노입자 체적농도를 증가시키면 열전달이 활발히 일어나 입구와 출구간의 온도차가 증가하게 되므로 유용도는 최대 20%가 증가함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 대향유동 이중관형 열교환기에서 나노유체의 강제대류 열전달 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 환형관과 원형관 양쪽 모두 나노유체를 흘리는 경우가 가장 열전달 성능향상이 우수하였다.
- (2) 대류열전달계수와 총합열전달계수는 유입유량과 나노입자 체적농도가 증가할수록 커지며 나노입자 체적농도 8%에서 최대 17%향상되었다.
- (3) 유입유량과 나노입자 체적농도가 증가할수록 열전달이 잘 일어나 열전달율은 증가한다. 기본유체($\phi=0.0$) 대비 $\phi=0.08$ 인 경우의 열전달율이 17% 향상되었다.
- (4) 나노입자의 유입유량이 증가할수록 마찰인자는 감소하였으나 동일 유량에서 나노입자 체적농도가 증가하면 점성계수가 증가하여 마찰인자도 증가한다. 마찰인자는 체적농도 8%에서 최대 136% 증가하였다.

REFERENCES

- [1] J. C. Maxwell. (1873). *Electricity and Magnetism*, Clarendon Press, Oxford, UK
- [2] 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.
- [3] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li & J. A. Eastman. (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *J. Heat Transf.*, 121, 280-289.
- [4] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae & N. Hishinuma. (1993). Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersions Of -Al₂O₃, SiO₂, and TiO₂ Ultra-Fine Particles). *Netsu Bussei (Japan)*, 4, 227-233.
- [5] Y. M. Xuan & Q. Li. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *Int. J. Heat Transfer*, 21, 58-64.
- [6] Y. M. Xuan & W. Roetze. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.* 43, 3701-3707.
- [7] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi & J. A. Eastman. (2002). Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluid), *Int. J. Heat Mass Transf.* 45, 855-863.
- [8] 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.
- [9] U. Rea, T. McKrell, L. Hu & J. Buongiorno. (2009). Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* 52, 2042-2048.
- [10] S. Mirmasoumi & A. Behzadmehr. (2008). Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 29, 557--566.
- [11] 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.
- [12] H. K. Choi & G. J. Yoo. (2014). Numerical study on nanofluids forced convection in circular tubes. *J. Comput. Fluids Eng.* 19, 37-43.

- [13] Y. Ding & D. Wen. (2005). Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions. *Powder Technol.* 149, 84-92.
- [14] H. K. Choi & Y. S. Lim. (2019). Numerical study of mixed convection nanofluid in horizontal tube. *J. of Convergence for Information Technology*, 9, 155-163.
- [15] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval & N. Galanis. (2007) Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two-phase approach. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28, 211-219.
- [16] S. C. Gupta & V. K. Garg. (1981). Developing flow in a concentric annulus. *Comput. Meth. Appl. Mech.* 28, 27-35.
- [17] M. A. I. El-Shaarawi & M. K. Alkam. (1992). Transient forced convection in the entrance region of concentric annuli. *Int. J. Heat Mass Transf.* 35, 3335-3344.
- [18] G. Lu & J. Wang. (2008). Experimental investigation on heat transfer characteristics of water flow in a narrow annulus. *Appl. Therm. Eng.* 28, 8-13.
- [19] A. N. S. Y. S. Fluent. (2019). *ANSYS Fluent User Guide V.19.1*, Southpointe : ANSYS, Inc.
- [20] K. Khanafer & K. Vafai. (2011). A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4010-4428.
- [21] 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.
- [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.

임윤승(Yun-Seung Lim)

[학생회원]



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

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