

U-밴드 관 내부 나노유체의 강제대류에 관한 수치적 연구

조성원¹, 최훈기^{2*}, 박용갑²

¹창원대학교 스마트제조융합협동과정 대학원생, ²창원대학교 기계공학부 교수

Numerical Study of Forced Convection Nanofluid in a U-Bend Tube

Sung-Won Jo¹, Hoon-Ki Choi^{2*}, Yong-Gap Park²

¹Student, Division of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

²Professor, Division of Mechanical Engineering, Changwon National University

요약 원형단면 U-밴드 튜브에서 층류인 나노유체(물/Al₂O₃)의 유동 및 열적 특성을 수치적으로 연구하였다. 이 연구에서는 U-밴드 내부유동에서 Reynolds 수와 고체 체적분율의 영향이 유동장, 열전달 및 압력강하에 미치는 영향을 연구했다. 원형곡관에 대한 이전에 발표된 실험 결과와 본 수치해석의 결과가 잘 일치함을 보여 해석방법의 타당성이 있음을 확인하였다. Reynolds 수 뿐만 아니라 나노입자의 고체 체적분율을 증가시키면 열전달계수도 증가함을 보였다. 또한 곡관에서 형성되는 2차 유동은 평균 열전달계수를 높이는 데 중요한 역할을 한다. 그러나 압력강하 곡선은 나노입자 농도가 증가함에 따라 크게 증가함을 보였다.

주제어 : 나노유체, U-밴드 튜브, 입자 체적분율(농도), Reynolds 수, 2차 유동, 열전달계수, 압력강하

Abstract Fluid flow and thermal characteristics of laminar nanofluid(water/Al₂O₃) flow in a circular U-bend tube have been studied numerically. In this study, the effect of Reynolds number and the solid volume fraction and the impact of the U-bend on the flow field, the heat transfer and pressure drop was investigated. Comparisons with previously published experimental works on horizontal curved tubes show good agreements between the results. Heat transfer coefficient increases by increasing the solid volume fraction of nanoparticles as well as Reynolds number. Also, the presence of the secondary flow in the curve plays a key role in increasing the average heat transfer coefficient. However, the pressure drop curve increases significantly in the tubes with the increase in nanoparticles volume fraction.

Key Words : Nanofluid, U-bend tube, solid volume fraction(concentration), Reynolds number, Secondary Flow, Heat Transfer Coefficient, Pressure Drop

1. 서론

전자장치의 냉각기, 소형열교환기, 원자로의 냉각코어 등 산업계에서 사용하고 있는 열교환기는 크기는 작고 고성능이어야 한다. 내부의 작동유체로 많이 사용되는 물, 오일 및 에틸렌글리콜 등은 낮은 열전

도도로 인하여 열교환기 성능향상과 소형화에 큰 걸림돌로 작용하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 훨씬 높은 전도성을 가진 열전달 유체를 개발하게 되었고 이를 위하여 유체에 열전도도가 큰 작은 고체입자를 부유시키는 방법이 개발되었다. 1873년 Maxwell[1]은 유체에 마이크로미터 또

*This paper was supported by the research fund of Changwon National University in 2021-2022.

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

Received January 11, 2022

Accepted March 20, 2022

Revised February 27, 2022

Published March 28, 2022

는 밀리미터 크기의 고체입자를 분산시키고 체적분율을 증가시킴으로써 유체-고체 혼합물의 열전도율을 증가시키는 가능성을 보여주었다. 밀리미터의 입자보다 더 미세한 나노미터 크기(일반적으로 100nm 미만)의 입자를 만드는 기술이 향상되었고 이를 물과 같은 기본 유체에 균일하고 안정적으로 분산시켜 나노유체라고 불리는 새로운 세대의 고체-액체 혼합물을 만들 수 있었다[2]. 즉, 물과 같은 열전도도가 낮은 유체에 소량의 고체 나노입자를 분산시키면 열전도도가 증가하게 된다[3-5].

나노유체의 대류 열전달 계수 및 총합 열전달계수에 대하여 발표된 연구의 대부분은 기본 유체의 열전달계수와 비교하여 나노유체의 열전달계수가 향상되었음을 보여주었다. Mirmasoumi등[6]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[7]은 수치해석을 통하여 나노입자의 농도 및 Reynolds 수를 변화시키며 열전달특성을 구하였다. 농도 및 Reynolds 수가 증가하면 대류 열전달계수가 증가함을 보였다. Choi등[8]은 원형관 내부 나노유체의 강제대류 열전달에서 수력학적 및 열적 발달과정 현상에 대한 연구를 수행하였다. 수력학적 및 열적 완전발달길이는 Reynolds 수가 증가할수록 길어지고 열적 발달 길이는 나노유체의 체적분율이 증가할수록 짧아짐을 보였다. 아울러 입자의 농도가 클수록 열전달계수가 증가함을 보였다. Choi등[9]은 수치해석을 이용하여 원형관에서 혼합대류 열전달특성을 구하였다. Richardson 수의 크기와 나노입자의 체적분율에 대한 대류 열전달계수를 구하였다. 체적분율이 증가할수록 대류 열전달계수도 증가함을 보였다. Farajollahi등[10]은 셸 및 튜브 열교환기에서 Al_2O_3 와 물의 나노유체 열전달특성에 대한 실험적 연구를 수행했다. 그들은 일정한 Peclet 수에서 나노입자 체적분율이 증가함에 따라 총합 열전달계수가 증가한다는 것을 관찰했다. Pak등[11]은 Al_2O_3 과 물의 나노유체를 사용하여 열전달특성을 연구했다. 그들은 나노입자 체적분율과 Reynolds 수가 증가하면 나노유체의 Nusselt 수가 증가한다고 보고하였다.

열교환기에는 보통 직관과 곡관의 혼합인 U-밴드

관이 많이 사용되고 있다. U-밴드 관으로 유체가 유입되면 곡관의 곡선 부분에서 원심력이 발생하고 이로 인하여 2차 유동이 형성된다. 단면 내의 2차 유동은 물질 전달과 열전달 향상을 유발하게 된다. 따라서 열전달 및 물질 전달에서 곡관 내부유동은 매우 중요하여 이에 대한 연구가 많이 수행되어져 왔다. Fairbank등[12]은 물이 작동유체인 180도 원형 단면 곡관에서 주 흐름속도가 단면중심보다 바깥 방향으로 편심 되게 분포됨을 실험을 통하여 구하였다. Kalb등[13]은 벽의 경계조건이 일정한 열유속 조건에서 Nusselt 수의 크기를 구하였다. 바깥 부에서의 국소 Nusselt 수가 안쪽 부에서보다 증가함을 보였고 Dean 수가 커지면 Nusselt 수도 증가함을 보였다.

U-밴드 관 내부에 나노유체를 유동시키면 나노입자에 의하여 열전달 성능이 향상될 뿐만 아니라 곡관 부의 형상적인 특성에 의하여 열전달이 향상되는 복합적인 현상이 일어나게 된다. 최근에는 곡관 내부에 작동유체가 나노유체인 경우에 대한 다수의 연구가 수행되고 있다. Kahani등[14]은 헬리컬코일 내부에 TiO_2/H_2O 의 나노유체에 대한 강제대류 열전달특성을 실험적으로 구하였다. Reynolds 수와 나노입자의 체적농도가 증가할수록 대류 열전달계수가 증가함을 보였다. Hashemi등[15]은 나선관 내부에 CuO 나노입자(평균 입자크기 50nm)를 기본 유체인 오일에 부유시켜 다양한 중량농도에 대하여 나노유체 흐름과 열전달특성을 연구하였다. 직관 대신 나선관을 사용함으로써 열전달 성능이 향상됨을 보였고 아울러 순수액체 대신 나노유체를 사용하는 것이 대류 열전달계수를 높인데 더 효과적인 방법이라고 주장했다. Kumar등[16]은 나선관에 Al_2O_3 /물의 나노유체 흐름에 대해 Nusselt 수가 55% 향상되고 마찰계수가 26% 증가함을 보고하였다.

곡관이나 나노유체에 대한 개별 연구는 많이 이루어졌음에도 불구하고, 열교환기 등에 많이 적용되고 있는 U-밴드 관의 곡관 유동과 나노유체를 모두 결합하는 경우의 연구는 부족하여 보다 심층적인 연구가 필요해 보인다. 본 연구에서는 균일한 온도를 가진 원형 단면의 U-밴드 관으로 구성된 직관-곡관 시스템 내부에 나노유체를 유동시켜 열전달특성 및 압력 강하를 수치적으로 연구하였다. 나노입자는 CuO 보다 가볍고 열전도도가 뛰어나 많이 사용되는

Al₂O₃를 사용하였다. 나노유체의 농도와 Reynolds 수의 크기에 따라 열전달 성능과 압력강하에 미치는 영향을 조사한다.

2. 수치해석 방법

2.1 형상 정보 및 지배방정식

Fig. 1은 본 연구의 전산해석에 적용된 대상 영역을 도식화한 것이다. 지름이 d인 원형 단면의 곡관부는 곡률반경이 R(=5d)인 180도 곡관이며, 곡관의 입구와 출구에 50d 길이의 직관을 부착한 U-밴드 관을 구성한다. 그림에서 표현된 A, B, C의 위치는 각각 곡관부 θ=0°, 90°, 180° 지점을 의미한다. 관의 내부에 기본 유체인 물에 나노입자인 알루미늄(Al₂O₃)를 혼합한 나노유체를 유입시킨다. 일반적으로 나노유체 입자크기(d_p)는 100nm 이하로 하는데 본 연구에서는 나노유체 물성치를 구하는데 사용한 수식(10)-(11)의 범위에 적합한 d_p=28nm의 나노입자를 사용하였다.

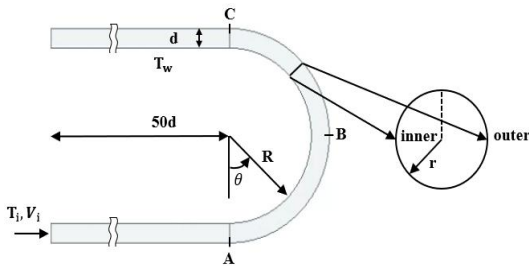


Fig.1 Geometry of the U-bend tube

나노유체는 액체-고체의 혼합이므로 본 연구에 사용된 입자거동은 상간의 침투와 상간의 속도차를 허용한 Euler-Mixture모델[17]을 사용하였다. 나노유체 제조 시 초음파처리, 계면활성제의 첨가 등 다양한 화학적인 방법을 사용하면 응집현상을 획기적으로 감소시키는 접근법이 개발되어 좋은 결과를 얻고 있으므로 응집과 침강현상은 고려하지 않았다. 나노유체의 유동 및 열전달 현상을 구하기 위하여 아래의 지배방정식들이 사용되었다.

연속방정식 :

$$\nabla \cdot (\rho_n u_n) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식 :

$$\nabla \cdot (\rho_n u_n u_n) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_n \nabla u_n) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k u_{dr,k} u_{dr,k} \right) \tag{2}$$

에너지 방정식 :

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k u_k \rho_k C p_k T) = \nabla \cdot (k_n \nabla T) \tag{3}$$

체적분율 방정식 :

$$\nabla \cdot (\phi_p \rho_p u_n) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p u_{dr,p}) \tag{4}$$

여기서 기술된 k, c_p, ρ 및 μ는 열전도도, 비열, 밀도 및 점성계수를 나타내며, 하첨자 f는 기본 유체, n은 나노유체, p는 나노입자를 의미한다. φ는 나노입자의 체적분율, u_n은 질량 평균속도, u_{dr,p}는 드리프트 속도를 나타낸다.

2.2 나노유체의 물성치

나노유체는 기본 유체와 나노입자의 혼합물이다. 기본 유체는 물이며 밀도(ρ_f), 점성계수(μ_f), 열전도도(k_f)는 온도의 영향을 고려하여 Zonouzi등[18]의 연구에 사용된 물성치를 사용하였고 수식은 아래의 식(5)~(7)과 같다. 비열(C_p)은 4200[J/kg·K]로 일정한 값을 적용하였다.

$$\rho_f = -3.1 \times 10^{-3} T^2 + 1.5917 T + 801.92 \tag{5}$$

$$\mu_f = 0.1917 e^{-0.0181 T} \tag{6}$$

$$k_f = -0.5981 + 0.00653 T - 8.354 \times 10^{-6} T^2 \tag{7}$$

아울러 나노입자인 Al₂O₃는 Zonouzi등[18]의 연구에 사용된 물성치를 사용하였으며 Table 1에 기본적인 물성치를 나타내었다.

Table 1 Properties of Al₂O₃ at T=298.15K

Property	ρ [kg/m ³]	C _p [J/kg·K]	k [W/m·K]
Value	3900	785	36

나노유체의 물성치는 나노입자의 크기(d_p), 나노입자의 체적분율(ϕ), 온도(T)등 여러 가지 인자들의 복잡한 함수관계로 나타난다. 나노유체의 밀도(ρ_n)와 비열(Cp_n)은 혼합모델[17]을 사용하였고 아래의 식 (8)-(9)와 같이 표현된다.

$$\rho_n = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (8)$$

$$(\rho Cp)_n = (1 - \phi)(\rho Cp)_f + \phi(\rho Cp)_p \quad (9)$$

나노유체의 점성계수(μ_n)은 Maiga등[7]에서 제안한 나노입자의 체적분율에 따른 2차 함수관계인 식 (10)을 사용하였다. 열전도도(k_n)은 Maxwell[1]이 제시한 식에서 Brownian 거동과 나노 입자크기, 체적분율(ϕ), 온도를 포함하여 나타낸 Koo등[19]의 식을 사용하였고 식 (11a)로 표현된다. Vajjha와 Das[20]는 Koo등[19]이 제안한 식에서 본인들의 실험 결과를 적용하여 나노입자의 체적분율과 온도의 범위를 더욱 확장 시켰고 식 (11b)와 (11c)를 제안하였다.

$$\frac{\mu_n}{\mu_f} = 1 + 7.3\phi + 123\phi^2 \quad (10)$$

$$k_n = \frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\phi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\phi} k_f + 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_f Cp_f \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi) \quad (11a)$$

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{273}\right) + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (11b)$$

$$\beta = 8.4407(100\phi)^{-1.07304} \quad (11c)$$

$$0.01 \leq \phi \leq 0.1, 298 \leq T \leq 363$$

수식(11a)의 앞부분은 정적거동을 나타내며 뒷부분은 Brownian 거동을 고려한 열전도도를 나타낸 식이다.

체적농도(ϕ)는 체적분율(ϕ)의 함수 $\phi = 100\phi$ 로 나타낼 수 있으며, Table 2는 체적농도 크기에 따른 나노유체의 물성치를 나타내었다.

Table 2 Properties of nanofluids at T=298.15K

ϕ (%)	ρ [kg/m^3]	Cp [$J/kg \cdot K$]	k [$W/m \cdot K$]	μ [$kg \cdot s/m^2$]
0.0	1000.92	4200	0.000869	0.6062
1.0	1029.91	4070	0.000943	0.6635
2.0	1058.90	3948	0.001038	0.6795
3.0	1087.89	3832	0.001155	0.6967
4.0	1116.88	3723	0.001294	0.7145
5.0	1145.87	3618	0.001453	0.7329

2.3 경계조건

지배방정식의 온도 및 속도에 대한 해를 구하기 위해 적절한 경계조건이 필요하다. 본 연구에서는 U-밴드 관의 입구에서 온도(T_i)가 298K 나노유체들이 주어진 유속(V_i)으로 유입된다. 출구에는 대기압력 경계조건을 주었으며, 관 내부 벽면은 no-slip 조건을 적용하였고 일정한 벽면 온도 조건($T_w = 348K$)을 부여하였다. 입구에서는 유량의 크기를 변화시키며 해석을 수행하였는데 이 경우의 Reynolds 수는 100-1,000 크기 범위로 층류 유동영역에서 해석을 수행하였다.

2.4 수치해석 검증

본 연구에는 해석 프로그램인 ANSYS FLUENT 2020 R1을 사용하였다. 해석에 사용한 격자수의 타당성을 검증하기 위하여 Reynolds 수가 1,000이고 체적농도가 5%인 경우, 4가지 격자수의 조건에서 해석을 진행하였다. 단면 A와 C에서 각각의 온도와 속도를 비교하였다. Table 3에서와 같이 56×60×200 격자계와 72×80×400 격자계의 결과값이 차이가 나지 않았으므로 본 연구에서는 56×60×200 격자계를 사용하였고 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구의 수치해석 타당성을 검증하기 위하여 Ebrahimmnia등[21]이 수행한 수치해석 및 Van de Vosse등[22]의 실험결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 무차원 속도가 최대 6% 이내의 오차로 크기와 경향이 잘 일치하였으므로 현재 적용된 수치적 방법이 타당함을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Al₂O₃/물의 나노유체를 원형 단면의 U-밴드 관에

유입시켜 유동 및 열전달특성을 구하였다. 체적농도 ($\Phi = 100\phi$) 및 Reynolds 수(Re)에 따른 속도 및 온도분포, 대류 열전달계수, 열전달을 그리고 압력강하의 특성을 구하였다.

3.1 속도 및 온도분포

원형 단면 곡관 내부에 나노유체가 유입되면 곡률로 인하여 유체는 곡률중심에서 바깥벽(outer) 방향으로 원심력이 발생한다. 이 힘에 대응하여 압력구배가 바깥벽에서 안쪽(inner) 벽 방향으로 작용하여 힘의 평형을 이루게 된다. 원형 단면 중심부 유체는 벽면 근처보다는 점성의 영향이 적어 주 흐름속도는 증가하므로 원심력이 더 커지게 되어 곡률중심에서 바깥벽으로 2차 유동이 생성된다. 벽면 근처 유체는 점성의 영향으로 주 흐름속도가 작아 압력구배에 의하여 바깥벽에서 안쪽 벽으로의 2차 유동이 형성된다. 따라서 Fig. 4와 같이 원형 단면 중심영역에서는 안벽에서 바깥벽으로, 벽면 근처에서는 바깥벽에서 안쪽 벽으로 상/하 대칭인 셀(2차 유동 vortex cell)을 가지는 2차 유동이 형성된다. Reynolds 수가 증가하면 2차 유동의 강도는 증가하고 경계층 두께도 더 얇아짐을 볼 수 있다. 2차 유동은 단면 중심부의 속도가 큰 유체를 바깥벽으로 이송시키는 역할을 하여 Fig. 5와 같이 주 흐름속도의 최대 점이 바깥벽 부근으로 치우쳐 나타나게 되어 바깥벽 부근에서 속도구배가 더욱 커짐을 볼 수 있다. 바깥벽으로 주 흐름속도의 치우침 현상은 곡관 영역 뿐만 아니라 직관부까지 나타나고 있으나 강도는 점점 완화된다.

Fig. 6는 곡관 $\theta=90^\circ$ 지점 (B 지점) 단면에서의 무차원 온도분포를 나타낸 그림이다. 이때 사용한 무차원 온도는 아래 식(12)과 같다.

$$T^* = (T - T_i) / (T_w - T_i) \quad (12)$$

여기서, 하첨자 i는 입구, w는 벽면을 의미한다.

단면에 생성된 2차 유동은 벽면 부근의 고온 유체를 안쪽 벽 부근으로 이송시키고 단면의 중심영역의 저온 유체를 바깥벽 부근으로 이송시키는 역할을 한다. 주 흐름속도의 최대지점은 바깥벽 부근으로 치우치고 주 흐름속도 구배가 증가하게 된다. 이로 인하여 온도 구배도 바깥벽 부근에서 더 커짐을 볼 수 있다.

Table 3 Mesh Independence

Node number ($\pi \times d \times \theta$)	T_A (K)	T_C (K)	V_A (m/s)	V_C (m/s)
40×40×200	318.81	322.37	0.1592	0.1601
56×60×200	318.78	322.51	0.1592	0.1601
56×60×400	318.78	322.51	0.1591	0.1601
72×80×400	318.77	322.51	0.1591	0.1601

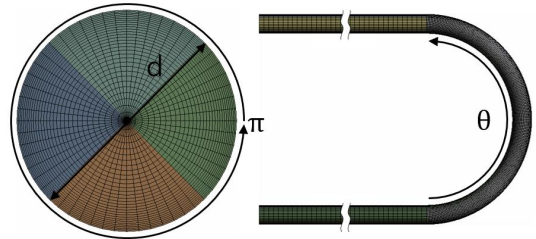


Fig.2 Mesh geometry of the U-bend tube

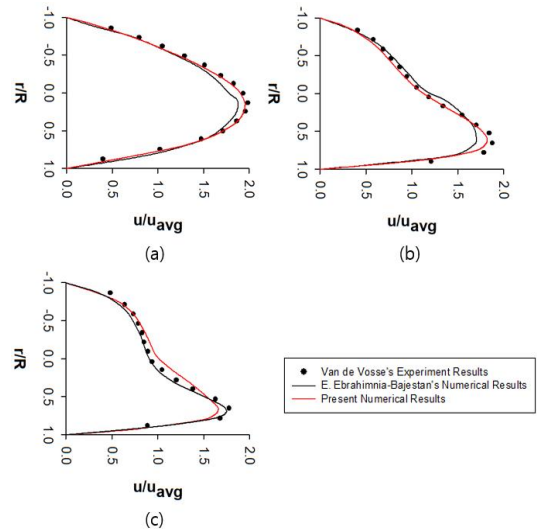


Fig. 3. Validation of numerical analysis at $d = 8\text{mm}$, $R = 24\text{mm}$, $Re = 300$ in the 90° bend tube: (a) $\theta = 22.5^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ (c) $\theta = 67.5^\circ$

이런 이유에서 곡관의 열전달특성이 직관보다 우수하게 된다. 나노입자의 체적농도가 증가하면 열전달 성능이 증가하여 바깥벽에서 온도 구배가 약간 증가하게 됨을 볼 수 있다.

직관에 대한 곡관의 열전달특성을 비교하기 위하여 나노입자의 체적농도가 0%, 5%인 경우 동일한 경계조건에서 같은 길이의 직관과 U-밴드 관에 대한 수치적 해석을 수행하여 $\theta = 180^\circ$ (C)지점 단면에서의 평균온도 크기를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 곡

관 또는 직관에 상관없이 나노입자의 체적농도가 증가하면 열전달특성이 좋아져 평균온도가 상승함을 보였다. 동일한 체적농도에서 곡관 유동이 직관 유동보다 평균온도가 높아짐을 볼 수 있어 곡관에서의 열전달 성능이 더 우수함을 볼 수 있다. Reynolds 수가 증가하면 입구의 질량유량이 증가(관의 직경은 일정)하는 경우이므로 단면에서의 평균온도는 낮아짐을 알 수 있다.

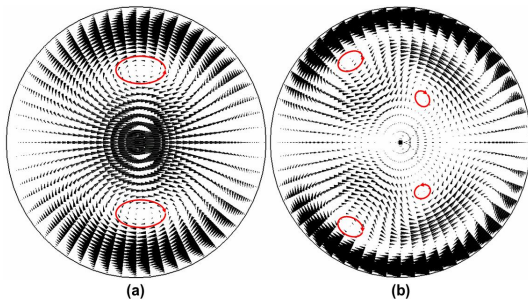


Fig. 4. Plots of secondary flow at cross section (B) at $\Phi = 0\%$: (a) $Re = 100$, (b) $Re = 1,000$

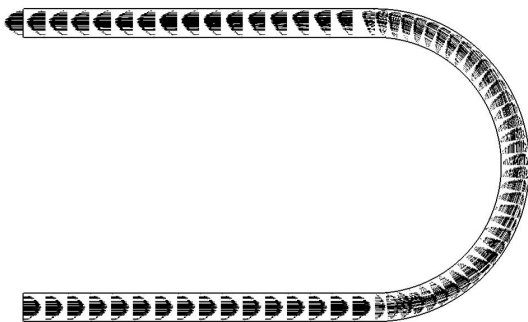


Fig. 5. Plots of streamwise velocity vector at $Re = 1000$ and $\Phi = 3\%$

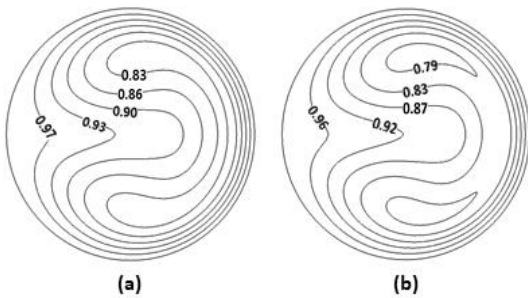


Fig. 6. Contour of dimensionless temperature at cross section (B) at $Re=100$: (a) $\Phi=0\%$, (b) $\Phi=5\%$

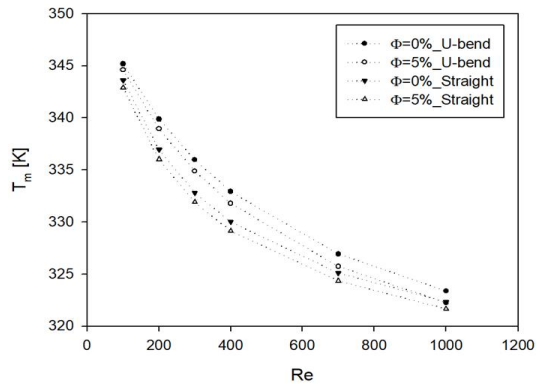


Fig. 7. Comparison of the mean temperature with the straight tubes and U-bend tubes at cross section (C)

3.2 대류 열전달계수

Fig. 8은 Reynolds 수가 각각 100, 1,000인 경우 나노입자의 체적농도 크기변화에 따른 관 길이 방향으로의 단면 둘레 평균 대류 열전달계수 (Peripheral Averaged Convective Heat Transfer Coefficient)를 나타낸 그림이다. U-밴드 관에서의 대류 열전달과 동일한 길이의 직관으로 구성된 관에서의 대류 열전달 크기도 비교하였다. 일정 유속의 유체가 관에 유입되면 입구 부분에서부터 온도경계층이 형성되는 구간이므로 관 입구에서는 경계층 두께가 얇아 대류 열전달계수가 아주 큰 값을 가지게 된다. 유동이 진행됨에 따라 경계층 두께가 증가하므로 대류 열전달계수도 점점 작아지게 된다. 직관인 경우는 열적으로 완전 발달 흐름이 되면 대류 열전달계수가 일정한 값을 가지게 됨을 볼 수 있다. U-밴드 관의 경우 유체가 곡관 입구($L/d=50, \theta=0^\circ$)로 유입됨에 따라 원심력에 의하여 형성된 2차 유동은 온도분포에 큰 영향을 끼치게 된다. 단면의 온도 분포는 Fig. 6에서 본 바와 같이 온도의 최소값 위치가 바깥벽 근처에서 형성됨으로 온도 구배가 커지고 이로 인하여 대류 열전달계수는 증가하게 된다. Mahdizadeh 등[23]의 90° 밴드 관의 전산해석에서도 대류 열전달계수가 직관부에서 점점 감소하다가 곡관부에서 급격히 증가하는 동일한 경향을 보였다. Reynolds 수가 작은 경우인 Fig. 8(a)에서는 $\theta=64^\circ$ 부근에서 최대값의 분포를 하다가 점점 감소함을 볼 수 있다. 이 지점에서의 2차 유동 강도가 가장 강하고 주 흐름속도 및 온도 구배가 가장 심한

영역으로 판단된다. 곡관에서 직관으로 되는 지점인 $L/d=65.7(\theta=180^\circ)$ 이후부터는 원심력의 영향은 없어지지만 곡관에서 생성된 2차 유동이 직관부까지 영향을 끼치게 되고 점점 강도는 줄어들게 되어 최소온도 위치가 단면의 중심부로 이동하게 되고 온도 경계층의 두께가 커져 대류 열전달계수가 점점 감소하게 됨을 볼 수 있다. 나노유체인 경우 기본 유체보다 대류 열전달계수가 증가함을 보이고 나노입자 체적농도가 커짐에 따라 대류 열전달계수의 분포는 비슷한 양상을 하지만 크기는 더 증가함을 볼 수 있다. 관의 단면적은 동일하게 주어졌 경우이므로 Reynolds 수가 $Re=100$ 에서 $Re=1,000$ 으로 증가하면 입구의 평균유속이 10배 증가하므로 대류 열전달계수의 크기는 직관부나 곡관부에서 모두 증가하게 된다. 특히 곡관부에서 형성되는 원심력은 유속의 제곱에 비례하므로 원심력 때문에 형성되는 2차 유동이 더 활발하게 형성되고 이로 인하여 대류 열전달계수의 크기도 훨씬 증가하게 됨을 볼 수 있다. $Re=1,000$ 인 경우 곡관에서의 대류 열전달계수가 2-peak 분포를 하는데 이는 단면에서 형성되는 2차 유동 형상과 밀접한 관계가 있다. $\phi=0\%$ 이고 $Re=1,000$ 인 경우 1차 최대지점($\theta=48^\circ$)과 2차 최대지점($\theta=150^\circ$)에서는 단면 내 2차 유동의 셀은 Fig. 4(a)와 유사하게 상/하로 2개의 셀이 형성되었지만, 그 사이의 변곡점($\theta=76^\circ$) 지점에서는 Fig. 4(b)와 같이 셀이 하나 더 추가로 형성되어 열전달 향상에 저해하는 작용을 한 것으로 판단된다.

일정한 벽면의 온도 조건에 대하여 U-밴드 관 입구와 출구 사이의 열전달율(\dot{Q}), 평균 대류 열전달계수(\bar{h})는 수식(13)-(15)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m} \bar{C}_p (T_o - T_i) \quad (13)$$

$$\bar{h} = \dot{Q} / A_s \Delta T_{lm} \quad (14)$$

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_o - \Delta T_i) / \ln(\Delta T_o / \Delta T_i) \quad (15)$$

여기서 하첨자 i와 o는 입구, 출구를 의미하며, \dot{m} , T , \bar{C}_p 는 각각 질량유량, 단면의 평균온도, 평균 비열을 표시한다. ΔT_{lm} 는 대수평균온도차, $A_s (= [100d + \pi R] \pi d)$ 는 전열면적을 나타낸다. 그리고 입구와 출구에서의 단면 평균

온도차는 각각 $\Delta T_i = T_w - T_i$, $\Delta T_o = T_w - T_o$ 이다.

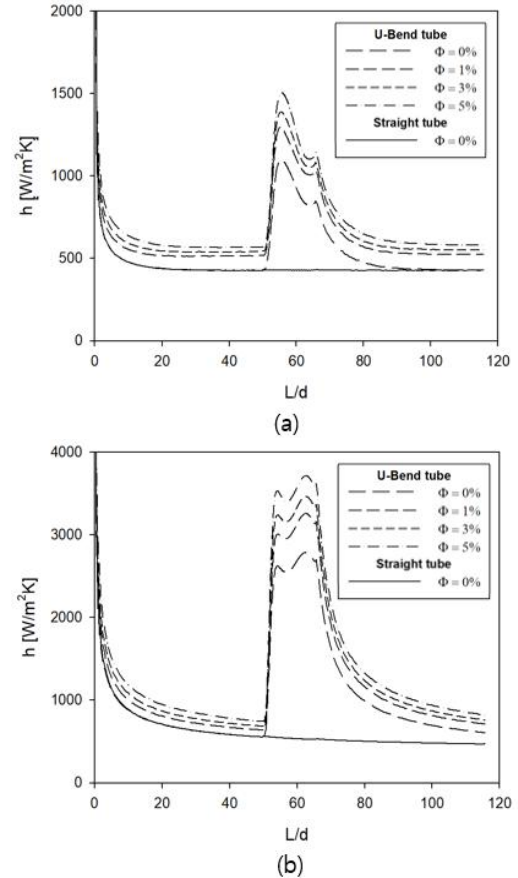


Fig. 8. Axial variations of peripheral average heat transfer coefficient for different volume concentration of nanoparticles : (a) $Re=100$, (b) $Re=1,000$

Fig. 9는 전 해석영역에 대하여 수식(14)로 표현되는 평균 대류 열전달계수를 나타낸 그림이다. Reynolds 수가 커지면 나노입자의 체적농도 크기와 상관없이 온도 경계층이 얇아지게 되고 온도구배가 증가하여 평균 대류 열전달계수는 증가함을 볼 수 있다. 동일한 값의 Reynolds 수에서 나노입자 체적농도가 증가하면 아울러 평균 대류 열전달계수의 크기도 증가함을 볼 수 있다. 하지만 기본 유체에 대한 나노유체의 평균 대류 열전달계수, $\bar{h}/\bar{h}_{\phi=0}$ 의 값은 동일한 나노입자 체적농도에 대하여 Reynolds 수가 증가하더라도 큰 변화가 없음을 확인하였다. Reynolds 수가 1,000인 경우 나노입자의 체적농도가 $\phi=1\%$, 2% ,

3%, 4%, 5%로 증가하면 $\bar{h}/\bar{h}_{\phi=0}$ 값의 크기는 각각 14%, 18%, 24%, 30%, 36%로 나노입자의 체적농도에 선형적으로 증가함을 보였다.

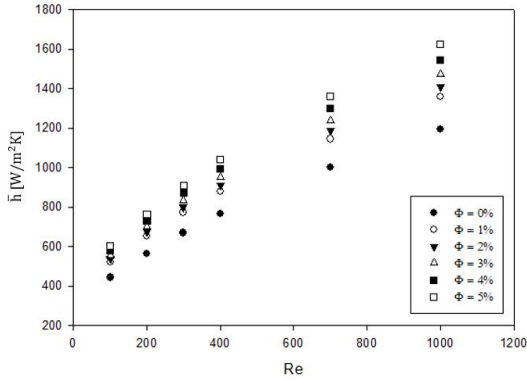


Fig. 9. Averaged heat transfer coefficient at different Reynolds numbers and volume concentration in entire tubes

3.3 열전달율

해석영역의 입구와 출구 사이 열전달율은 수식(13)과 같이 나타낼 수 있으며 Fig. 10은 나노입자의 체적농도와 Reynolds 수에 따른 열전달율의 크기를 나타낸 그림이다. Reynolds 수가 증가하면서 유입되는 단면 내 유체의 유속이 커지게 되고 온도경계층이 얇아져 대류 열전달계수가 증가하므로 열전달율이 증가하게 된다. 나노입자의 체적농도가 증가할수록 열전도도 상승하기 때문에 열전달율이 상승하게 된다. 열전달율은 기본 유체와 비교하여 $\phi = 5\%$ 인 경우 최대 35% 향상되었다.

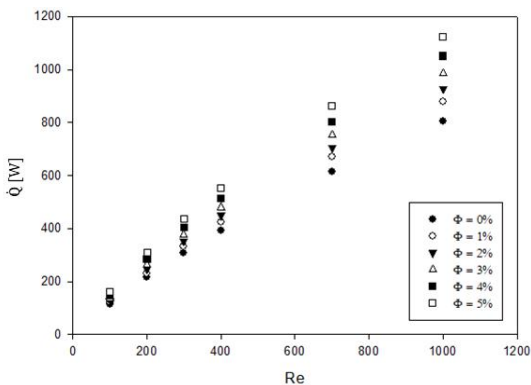


Fig. 10. Heat transfer rate at different Reynolds numbers and volume concentration in entire tubes

3.4 압력 강하

배관 설계에서 마찰에 의한 압력 강하는 펌프의 동력을 결정하는 중요한 요소이다. 내부유동에서 압력 강하는 벽면과 유체의 점성으로 인한 마찰 때문에 발생한다. 서로 다른 Reynolds 수와 체적농도에서 입구와 출구 사이의 압력 강하와 같은 길이에서의 직관의 압력 강하를 비교하여 나타내었다.

Reynolds 수와 체적농도의 변화에 따른 입구와 출구 사이의 압력 강하를 Fig. 11에 나타내었다. Reynolds 수가 커질수록 배관 내부의 유속이 빨라지므로 압력 강하량이 증가함을 볼 수 있다. 나노입자의 체적농도가 커질수록 나노유체의 점성이 증가하기 때문에 관과의 마찰이 증가하여 압력 강하량도 증가한다. 다만 Reynolds 수가 작은 영역에서는 나노입자의 체적농도의 영향은 거의 없었으나 Reynolds 수가 큰 경우 나노유체의 체적농도가 증가함에 따라 압력 강하량의 증가량이 크게 증가함을 볼 수 있다. Reynolds 수가 1,000인 경우 나노입자의 체적농도가 $\phi = 1\%$, 2% , 3% , 4% , 5% 와 $\phi = 0\%$ 인 경우와 비교하면 압력 강하량은 각각 13%, 34%, 61%, 99%, 144%로 증가하였다.

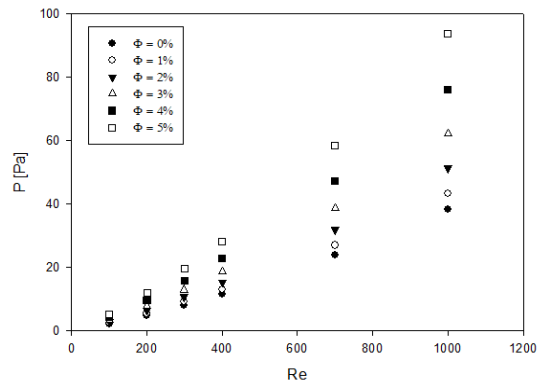


Fig. 11. Pressure drop at different Reynolds numbers and volume concentration in entire tubes

4. 결론

본 연구는 곡관을 가지는 U-밴드 배관에서 나노유체의 열전달 및 유동 특성에 대한 수치해석을 수행하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) U-밴드관의 곡관을 통과하면서 원심력에 의하여 형성된 2차 유동에 의하여 주흐름속도가 바깥벽으로 치우치게 되어 속도구배 및 온도구배가 증가한다.
- (2) Reynolds 수와 나노입자의 체적농도가 증가할수록 평균 대류 열전달계수는 상승하였으며, 기본 유체와 비교하여 체적농도가 5%인 경우 최대 36% 증가하였다.
- (3) Reynolds 수와 나노입자의 체적농도가 증가할수록 열전달률은 상승하였다.
- (4) 압력 강하는 Reynolds 수와 체적농도에 선형적으로 증가하였으며, 기본 유체와 비교하여 체적농도가 5%인 경우 최대 144% 증가하였다.

REFERENCES

- [1] J. C. Maxwell. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vol. 1). Clarendon press.
- [2] S. U. Choi, D. A. Singer & H. P. Wang. (1995). Developments and applications of non-Newtonian flows. *ASME Fed*, 66, 99-105.
- [3] S. Lee, S. U. S. Choi, S. Li & J. A. Eastman. (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121(2), 280-289. DOI : 10.1115/1.2825978
- [4] H. Masuda, A. Ebata & K. Teramae. (1993). Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. (Dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 , and TiO_2 ultra-fine particles) *Netsu Bussei (Japan)*, 4(4), 227-233.
- [5] O. Mahian, A. Kianifar, S. A. Kalogirou, I. Pop, & S. Wongwises, (2013). A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 585-594. DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.037
- [6] S. Mirmasoumi & A. Behzadmehr. (2008). Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube. *International journal of heat and fluid flow*, 29(2), 557-566. DOI : 10.1016/j.ijheatfluidflow.2007.11.007
- [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 flow. *International journal of heat and fluid flow*, 26(4), 530-546. DOI : 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.02.004
- [8] H. K. Choi & G. J. Yoo. (2014). Numerical study of nanofluids forced convection in circular tubes. *Journal of computational fluids engineering*, 19(3), 37-43. DOI : 10.6112/ksfce.2014.19.3.037
- [9] H. K. Choi & Y. S. Lim. (2019). Numerical study of mixed convection nanofluid in horizontal tube. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(8), 155-163. DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.8.155
- [10] B. Farajollahi, S. G. Etemad & M. Hojjat. (2010). Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), 12-17. DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.019
- [11] B. C. Pak & Y. I. Cho. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11(2), 151-170. DOI : 10.1080/08916159808946559
- [12] J. A. Fairbank & R. M. So. (1987). Upstream and downstream influence of pipe curvature on the flow through a bend. *International journal of heat and fluid flow*, 8(3), 211-217. DOI : 10.1016/0142-727X(87)90030-0
- [13] C. E. Kalb & J. D. Seader. (1972). Heat and mass transfer phenomena for viscous flow in curved circular tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(4), 801-817. DOI : 10.1016/0017-9310(72)90122-6
- [14] M. Kahani, S. Z. Heris & S. M. Mousavi. (2014). Experimental investigation of TiO_2 /water nanofluid laminar forced convective heat transfer through helical coiled tube. *Heat and Mass Transfer*, 50(11), 1563-1573. DOI : 10.1007/s00231-014-1367-4
- [15] S. M. Hashemi & M. A. Akhavan-Behabadi. (2012). An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(1), 144-151. DOI : 10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.09.002
- [16] P. C. Mukesh Kumar, J. Kumar & S. Suresh. (2012). Heat transfer and friction factor studies in helically coiled tube using Al_2O_3 /water Nanofluid. *European Journal of Scientific*

Research, 82, 161-172.

- [17] ANSYS. (2019). *ANSYS Fluent V.19 User Guide*, USA.
- [18] S. A. Zonouzi, H. Aminfar & M. Mohammadpourfadr. (2014). 3D numerical investigation of thermal characteristics of nanofluid flow through helical tubes using two-phase mixture model. *International Journal Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 15(6), 512-521.
DOI : 10.1080/15502287.2014.952847
- [19] J. Koo & C. Kleinstreuer. (2004). A new thermal conductivity model for nanofluids. *Journal of Nanoparticle research*, 6(6), 577-588.
DOI : 10.1007/s11051-004-3170-5
- [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(21-22), 4675-4682.
DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.027
- [21] B. E. EBRAHIMNIA & H. Niazmand. (2011). Convective heat transfer of nanofluids flows through an isothermally heated curved pipe. *Iran. J. Chem. Eng*, 8(2), 81-97.
- [22] F. N. Van de Vosse, A. A. Van Steenhoven, A. Segal & J. D. Janssen. (1989). A finite element analysis of the steady laminar entrance flow in a 90° curved tube. *International journal for numerical methods in fluids*, 9(3), 275-287.
DOI : 10.1002/flid.1650090304
- [23] H. Mahdizadeh & N. M. Adam. (2021). Numerical study of heat transfer in 90° bend tube by Al₂O₃ nanofluids using fluid injection. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 19(1), 127-148.
DOI : 10.1108/JEDT-02-2020-0061

조 성 원(Sung-Won Jo)

[학생회원]



- 2021년 2월 : 창원대학교 기계공학부(공학사)
- 2021년 2월 ~ 현재 : 창원대학교 스마트제조융합협동과정(공학석사과정)
- 관심분야 : 에너지시스템, 전산유체역학
- E-Mail : d1player@changwon.ac.kr

최 훈 기(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

박 용 갑(Yong-Gap Park)

[정회원]



- 2016년 5월 : LG전자(주) 선임연구원
- 2020년 3월 : 부산대학교 롤스 로이스 대학기술센터 연구교수
- 2020년 4월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 전산유체역학, 미세먼지 전기 집진기
- E-Mail : pyg777@changwon.ac.kr